

**Modelowe kompleksy agroenergetyczne:  
Technologie pozyskania i kondycjonowania  
biomasy rolniczej i wodnej  
dla biogazowni i zgazowarki**



# **Modelowe kompleksy agroenergetyczne: Technologie pozyskania i kondycjonowania biomasy rolniczej i wodnej dla biogazowni i zgazowarki**

pod redakcją  
**Janusza Gołaszewskiego**



Kolegium Wydawnicze UWM  
Przewodniczący  
ZBIGNIEW CHOJNOWSKI

Recenzenci  
ADAM CENIAN  
IRENA WOJNOWSKA-BARYŁA

Redaktor naukowy  
JANUSZ GOŁASZEWSKI

Zespół autorów

WOJCIECH BUDZYŃSKI, WŁADYSŁAW SZEMPLIŃSKI, ADAM PARZONKA, TOMASZ SAŁEK,  
JÓZEF TWORKOWSKI, STEFAN SZCZUKOWSKI, MARIUSZ STOLARSKI, MICHAŁ KRZYŻANIAK,  
ŁUKASZ GRABAN, MIROSLAW KRZEMIENIEWSKI, MARCIN DĘBOWSKI, MARCIN ZIELIŃSKI,  
CEZARY PURWIN, BARBARA PYSERA, MAJA FIJAŁKOWSKA, JAN TYWOŃCZUK

Monografia wchodzi w skład serii wydanej w ramach projektu kluczowego *Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii*, nr POIG.01.01.02-00-016/08, koordynowanego przez Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku i realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka na lata 2007–2013

**ISBN 978-83-7299-873-6**

© Copyright by Wydawnictwo UWM • Olsztyn 2014

Wydawnictwo UWM  
ul. Jana Heweliusza 14, 10-718 Olsztyn  
tel. 89 523-36-61, fax 89 523-34-38  
[www.uwm.edu.pl/wydawnictwo/](http://www.uwm.edu.pl/wydawnictwo/)  
e-mail: [wydawca@uwm.edu.pl](mailto:wydawca@uwm.edu.pl)

---

Ark. wyd. 30,7; ark. druk. 26,0  
Druk: Zakład Poligraficzny UWM w Olsztynie, zam. 206

## Spis treści

Od Redaktora .....	9
ROLNICZA, ENERGETYCZNA I EKONOMICZNA EFEKTYWNOŚĆ PRODUKCJI BIOMASY WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN Z PRZEZNACZENIEM NA BIOGAZ (Wojciech Budzyński, Władysław Szempliński, Adam Parzonka, Tomasz Sałek)	
1. Wstęp, cel i hipotezy badawcze .....	11
2. Przegląd piśmiennictwa .....	14
2.1. Biomasa i biogaz rolniczy .....	14
2.2. Energetyczna i ekonomiczna efektywność produkcji .....	26
2.3. Wymagania siedliskowe i agrotechniczne traw typu C <sub>4</sub> .....	29
2.3.1. Kukurydza zwyczajna ( <i>Zea mays</i> L.) .....	29
2.3.2. Sorgo cukrowe ( <i>Sorghum saccharatum</i> ) (L.) Moench.) .....	43
2.3.3. Miskant olbrzymi ( <i>Miscanthus x giganteus</i> Greef et Deu) i miskant cukrowy ( <i>Miscanthus sacchariflorus</i> (Maxim.) Hack) .....	50
2.4. Wymagania siedliskowe i agrotechniczne traw typu C <sub>3</sub> i roślin bobowych oraz ich mieszanek z trawami .....	62
2.4.1. Lucerna siewna ( <i>Medicago sativa</i> L.) .....	62
2.4.2. Rutwica wschodnia ( <i>Galega orientalis</i> Lam.) .....	70
2.4.3. Kupkówka pospolita ( <i>Dactylis glomerata</i> ) i tymotka łąkowa ( <i>Phleum pratense</i> L.) .....	76
2.4.4. Mieszanki lucerny siewnej ( <i>Medicago sativa</i> L.) i koniczyny łąkowej ( <i>Trifolium pratense</i> L.) z tymotką łąkową ( <i>Phleum pratense</i> L.) ..	82
3. Metodyka badań .....	88
3.1. Badania polowe i laboratoryjne .....	89
3.2. Analiza energetyczna .....	98
3.3. Analiza ekonomiczna .....	100
3.4. Analiza statystyczna .....	102
4. Plony biomasy badanych gatunków roślin .....	102
4.1. Agrometeorologiczne uwarunkowania plonowanie roślin .....	102
4.2. Plonowanie traw C <sub>4</sub> .....	106
4.3. Plonowanie roślin bobowych (motylkowych) i traw C <sub>3</sub> .....	112
5. Energetyczna wydajność i sprawność produkcji biomasy .....	124
5.1. Trawy C <sub>4</sub> .....	124
5.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C <sub>3</sub> .....	133
6. Ekonomiczna sprawność produkcji biomasy .....	144
6.1. Trawy C <sub>4</sub> .....	144
6.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C <sub>3</sub> .....	149

7. Właściwości biomasy i biogazodochodowość .....	166
7.1. Trawy C <sub>4</sub> .....	166
7.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C <sub>3</sub> .....	178
8. Wnioski .....	190
9. Technologie produkcji na gruntach ornych roślin energetycznych na biogaz .	193
9.1. Trawy C <sub>4</sub> .....	193
9.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C <sub>3</sub> .....	202
10. Wykaz literatury .....	267

PRODUKCYJNOŚĆ WIERZBY KRZEWIASTEJ  
I ŚLĄZOWCA PENSYLWAŃSKIEGO ORAZ PRZYDATNOŚĆ  
ICH BIOMASY DO KONWERSJI W TERMOGENERATORZE (*Józef Tworkowski,  
Stefan Szczukowski, Mariusz Stolarski, Michał Krzyżaniak, Łukasz Graban*)

1. Wprowadzenie i przegląd literatury .....	283
2. Cel badań .....	288
3. Metodyka .....	288
3.1. Badania polowe i warunki ich prowadzenia .....	288
3.2. Ocena laboratoryjna biomasy .....	291
3.3. Analiza statystyczna .....	292
3.4. Analiza ekonomiczno-energetyczna .....	292
3.5. Zgazowanie biomasy w termogeneratorze .....	294
4. Omówienie wyników .....	297
4.1. Produkcyjność i analiza ekonomiczno-energetyczna produkcji wierzby krzewiastej .....	297
4.1.1. Plon i elementy jego struktury .....	297
4.1.2. Wartość opałowa i skład elementarny biomasy .....	306
4.1.3. Opłacalność uprawy .....	314
4.1.4. Energochłonność uprawy wierzby krzewiastej .....	319
4.2. Produkcyjność i analiza ekonomiczno-energetyczna produkcji ślázowca pensylwańskiego .....	322
4.2.1. Plon i elementy jego struktury .....	322
4.2.2. Wartość opałowa i skład elementarny biomasy .....	326
4.2.3. Opłacalność uprawy .....	327
4.2.4. Energochłonność uprawy ślázowca pensylwańskiego .....	331
4.3. Przydatność biomasy wierzby krzewiastej i ślázowca do zgazowania w ter- mogeneratorze .....	333
5. Podsumowanie i wnioski .....	336
6. Literatura .....	338

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA BIOMASY GLONÓW I NACZYNIOWYCH  
ROŚLIN WODNYCH NA CELE PRODUKCJI BIOGAZU (*Miroslaw Krzemieniewski,  
Marcin Dębowski, Marcin Zieliński*)

1. Wstęp .....	341
1.1. Kierunki wykorzystania roślinności wodnej na cele energetyczne .....	342
1.2. Wykorzystanie biomasy hydrofitów w procesach fermentacji metanowej .....	343
1.3. Ograniczenia związane z wykorzystaniem hydrofitów na cele produkcji biogazu .....	346
1.4. Potencjalne korzyści wykorzystania biomasy glonów na cele produkcji biogazu .....	348
1.5. Zastosowanie makroglonów w procesach fermentacji metanowej .....	348
1.6. Zastosowanie mikroglonów w procesach fermentacji metanowej .....	350
1.7. Kofermentacja biomasy glonów z typowymi roślinami energetycznymi .....	353
1.8. Zastosowanie makrofitów środowiska wodnego w procesach fermentacji metanowej .....	355
2. Cele i zakres badań .....	357
3. Metodyka badań .....	358
3.1. Eksperyment I .....	358
3.2. Eksperyment II .....	363
3.3. Eksperyment III .....	366
3.4. Metody analityczne .....	368
4. Omówienie wyników badań .....	370
4.1. Eksperyment I .....	370
4.1.1. Efektywność pracy instalacji do pozyskiwania biomasy glonów .....	370
4.1.2. Struktura taksonomiczna biomasy glonów .....	373
4.1.3. Charakterystyka i właściwości biomasy glonów .....	374
4.1.4. Wyniki badań respirometrycznych .....	375
4.2. Eksperyment II .....	376
4.2.1. Charakterystyka i właściwości biomasy .....	376
4.2.2. Charakterystyka ilości i składu biogazu .....	376
4.2.3. Charakterystyka osadów pofermentacyjnych .....	379
4.3. Eksperyment III .....	380
4.3.1. Zmiany wartości wskaźnika ChZT w fazie rozpuszczonej .....	380
5. Analiza ilościowa i energetyczna biomasy roślinności wodnej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego .....	384
5.1. Średnie ilości biomasy roślin wodnych pozyskanych podczas prac związanych z koniecznością oczyszczania zbiorników wodnych .....	384
5.2. Bilans energetycznej przetworzonej w biogaz biomasy wodnej pozyskanej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego .....	385
6. Podsumowanie i wnioski .....	387
7. Literatura .....	388

EFEKTYWNE METODY KONSERWACJI BIOMASY Z CELOWYCH UPRAW  
ENERGETYCZNYCH (*Cezary Purwin, Barbara Pysera, Maja Fijałkowska,  
Jan Tywończuk*)

1. Wstęp .....	397
2. Metodyka .....	398
3. Wyniki .....	401
3.1. Skład chemiczny i wartość energetyczna świeżej biomasy przed przechowywaniem .....	401
3.2. Skład chemiczny oraz straty energii w czasie przechowywania biomasy różnych gatunków .....	402
3.3. Wydajność biogazowa przechowywanej biomasy .....	406
3.4. Koszty przygotowania do przechowywania i koszty przechowywania biomasy z różnych surowców roślinnych .....	411
4. Dyskusja .....	412
5. Podsumowanie .....	415
6. Literatura .....	415



## Od Redaktora

Poszukiwanie efektywnych sposobów wytwarzania paliw alternatywnych i konwersji do energii użytecznej jest ważnym elementem rozwoju energetyki lokalnej i budowania podstaw samodzielności energetycznej. O potencjale energetyki odnawialnej stanowią naturalne zasoby odnawialne, w tym źródła biologiczne i odpady.

W niniejszej edycji serii wydawniczej poświęconej modelowym kompleksom agroenergetycznym zamieszczono trzy opracowania monograficzne konfrontujące wyniki badań własnych realizowanych w ramach Projektu Kluczowego POIG.01.01.02.-00-016/08 pt. „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii” na tle literatury światowej.

Tom I: *Technologie pozyskania i kondycjonowania biomasy rolniczej i wodnej dla biogazowni i zgazowarki*

Tom II: *Prosumenckie instalacje biogazowni i estryfikatorni*

Tom III: *Teoretyczne i eksperymentalne aspekty pirolizy odpadów*

W sekwencji wymienionych monografii ujęto proces generowania energii z materiałów pochodzenia organicznego i innych, począwszy od surowca pozyskiwanego z upraw rolniczych (rośliny zielne i zdrewniałe) i zeutrofizowanych zbiorników wodnych, łącznie z oceną wartości energetycznej surowca i uzysku energii użytecznej (Tom I), poprzez oryginalne rozwiązania pilotażowych mikroinstalacji procesu fermentacji metanowej i estryfikacji (Tom II), aż po wyniki badań dotyczące struktury produktów energetycznych procesu pirolizy szerokiego spektrum odpadów (Tom III).

W niniejszej monografii (Tom I) dokonano syntezy wyników badań nad:

– technologiami produkcji biomasy roślin zielnych o wysokim potencjale fermentacyjnym, w tym: kukurydzy (jako obiektu referencyjnego), sorga cukrowego, miskantu olbrzymiego, miskantu cukrowego, lucerny siewnej, rutwicy wschodniej oraz koniczyny łąkowej i lucerny siewnej w mieszance z trawami (tymotką łąkową);

– technologiami konserwacji biomasy wraz z oceną zdolności konserwacyjnych w kontekście zapewnienia ciągłości dostaw biomasy do biogazowni;

– technologiami dedykowanej produkcji biomasy roślin drzewiastych pre-dysponowanej do procesów termicznego przetwarzania (wierzba, ślazier) wraz z oceną wartości energetycznej i uzysku gazu generatorowego w procesie zgazowania, a także oceną przydatności nawozowej pozostałości z procesów wytwarzania energii;

– technologiami pozyskania i konserwowania biomasy roślin wodnych ze zbiorników wodnych, obejmującymi zarówno charakterystykę składu gatunkowego oraz koncentrację biomasy w Zatoce Gdańskiej, Zalewie Wiślanym, Jeziorze Kortowskim, jak i opracowania oryginalnej instalacji pozyskiwania i kondycjonowania biomasy wodnej oraz oceny wartości jako substratu biogazowni.

Wyrażam przekonanie, iż prezentowane w niniejszej monografii kompleksowe podejście do problematyki odnawialnych źródeł energetycznych: surowców biologicznych i odpadów oraz sposobu ich pozyskania, konserwowania, kondycjonowania i przechowywania w kontekście generacji energii będzie z jednej strony ważnym wkładem do wiedzy na temat odnawialnych surowców energetycznych, z drugiej zaś – inspiracją do dalszych badań i skutecznego zastosowania wyników badań w praktyce ekoenergetycznej.

# **ROLNICZA, ENERGETYCZNA I EKONOMICZNA EFEKTYWNOŚĆ PRODUKCJI BIOMASY WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN Z PRZEZNACZENIEM NA BIOGAZ**

Autorzy:

Wojciech Budzyński (w zakresie podrozdziałów: 3.; 4.2.; 8; 10.)

Władysław Szempliński (w zakresie podrozdziałów: 2.1.; 2.2.; 3; 4.3.; 8; 10.)

Adam Parzonka (w zakresie podrozdziałów: 1.; 2.4.; 4.1.; 4.3.; 5.2.; 6.2.; 7.2.; 8; 9.2.; 10.)

Tomasz Sałek (w zakresie podrozdziałów: 1.; 2.3.; 4.1.; 4.2.; 5.1.; 6.1.; 7.1.; 8; 9.1.; 10.)

## **1. Wstęp, cel i hipotezy badawcze**

Wzrost zapotrzebowania na energię, która obecnie produkowana jest głównie z paliw kopalnych, wymusił potrzebę poszukiwania alternatywnych i zarazem przyjaznych środowisku źródeł energii [154]. Z uwagi na uwarunkowania regionalne i lokalne oraz warunki klimatyczne i geograficzne w Polsce największy potencjał energii odnawialnej ma biomasa stała [99, 111, 157, 173]. Jej udział w pozyskaniu wszystkich nośników energii odnawialnej w 2011 roku wynosił 85,6% [121]. Prognozuje się, że również w najbliższym czasie biomasa będzie stanowić największy udział w produkcji energii odnawialnej, zwłaszcza elektrycznej [191].

Do niedawna w Polsce biomasa do celów energetycznych była pozyskiwana przede wszystkim z obszarów leśnych. Obecnie uważa się, że głównym producentem biomasy na cele energetyczne powinno stać się rolnictwo. Dotychczasowe użytkowanie gruntów rolniczych nie jest intensywne, więc przy niewielkim zwiększeniu wykorzystania czynników plonotwórczych i plonochronnych oraz zmianie systemu gospodarowania można osiągnąć znaczący wzrost plonów, a zwolnione grunty przeznaczyć pod rośliny energetyczne [41, 110].

Kuś i Faber [202] podają, że Polska postrzegana jest w Unii Europejskiej jako kraj o dużych potencjalnych możliwościach produkcji biomasy na cele energetyczne. Wynika to z dużej powierzchni użytków rolnych przypadających na mieszkańca. Obecnie szacowana powierzchnia użytków rolnych potencjalnie przydatnych pod dedykowane uprawy energetyczne wynosi 954 tys. ha (co stanowi 4,6% użytków rolnych). Wiesenthal [358] optymistycznie ocenia, że w Polsce w 2020 roku pod celowe uprawy energetyczne dostępnych będzie aż

4,3 mln ha gruntów ornych, co znacząco przewyższy areał przeznaczony na ten cel w innych krajach Unii Europejskiej. Szacuje się, że potencjał energetyczny polskiego rolnictwa wskazuje na docelową możliwość pozyskiwania substratów niezbędnych do wytwarzania 5–6 mld m<sup>3</sup> biogazu rocznie [268]. Regionalne zróżnicowanie tego potencjału jest duże, a największe możliwości produkcji substratów występują w województwach: wielkopolskim, mazowieckim i warmińsko-mazurskim. Najbardziej na produkcji biomasy energetycznej powinny skorzystać województwa warmińsko-mazurskie, lubelskie, kujawsko-pomorskie, zachodniopomorskie, podlaskie i podkarpackie [372].

Głównym instrumentem polityki Unii Europejskiej są akty prawne, które nakładają na kraje członkowskie obowiązek osiągania ustalonego udziału energii odnawialnej w ogólnie zużytej energii [181]. W 2009 roku przyjęto uchwałę dotyczącą Polityki Energetycznej Polski do 2030 roku, w której określono udział odnawialnych źródeł energii w całkowitym zużyciu energii do co najmniej 15% w 2020 roku i dalszy wzrost tego wskaźnika w kolejnych latach. W jego uzyskaniu ma pomóc stworzenie optymalnych warunków do rozwoju energetyki odnawialnej opartej na lokalnie dostępnych surowcach [372].

Istotną rolę wśród alternatywnych nośników energii odnawialnej powinien odgrywać biogaz otrzymywany z biomasy oraz jego energetyczne wykorzystanie. Może on stanowić substytut gazu ziemnego oraz paliwo napędowe w transporcie [290, 333]. Jego dotychczasowy udział w bilansie energetycznym jest niski (1,6% energii odnawialnej), dlatego priorytetową sprawą jest rozwój biogazowni rolniczych, w których można produkować energię nie tylko z biomasy pochodzącej z upraw celowych, ale także z odpadów pochodzenia roślinnego i zwierzęcego [154]. Rządowy program „Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010–2020” zawiera plan poprawienia warunków inwestowania w biogazownie rolnicze [174]. Powinno to spowodować dynamiczny wzrost produkcji biogazu wykorzystywanego w głównej mierze do produkcji energii elektrycznej i cieplnej [241]. Wskazuje na to dokument rządowy pod nazwą „Rozwój energetyki rozproszonej do 2020 roku w oparciu o biogaz pochodzenia rolniczego” [340]. Może to oznaczać zmianę oblicza polskiego rolnictwa, w którym produkcja surowców energetycznych i energii będzie równie ważna jak produkcja surowców żywnościowych i żywności. Według niektórych autorów [173, 292, 340] będzie to miało strategiczne znaczenie dla rozwoju rolniczego rynku biomasy i stanie się stymulatorem rozwoju rolnictwa oraz szansą na dywersyfikację produkcji roślinnej już w najbliższej dekadzie. Biogazownie rolnicze, zlokalizowane w poszczególnych regionach, poprawią bezpieczeństwo energetyczne kraju, spowodują zrównoważony rozwój obszarów wiejskich poprzez rozwój rynku biomasy, tworzenie nowych miejsc pracy w rolnictwie i jego otoczeniu oraz poprawę dochodowości gospodarstw rolniczych [109, 153, 158, 208, 268].

Produkcja biogazu może opierać się na wielu rodzajach biomasy [114, 323, 357]. Surowcem do fermentowania mogą być praktycznie wszystkie substancje organiczne, zarówno roślinnego, jak i zwierzęcego pochodzenia. Z tego względu rolnictwo jest postrzegane jako główny sektor gospodarki mogący dostarczać biomasy na potrzeby bioenergetyki. Można do tego wykorzystywać celową produkcję roślin energetycznych na użytkach rolnych [104], jak również pozyskiwać surowce energetyczne z roślin jednorocznych i wieloletnich oraz pozostałości i odpadów z produkcji rolnej, które ulegają biologicznemu rozkładowi [114, 181]. Z doświadczeń zachodniej Europy wynika, że jako rośliny energetyczne pod uwagę powinny być brane: kukurydza kiszunkowa, zboża na kiszonkę z całych roślin, okopowe korzeniowe, lucerna czy trawy. O przydatności surowca decyduje plon biomasy wyprodukowanej z jednostki powierzchni, a przede wszystkim plon suchej masy i suchej masy organicznej [112, 232, 244]. Z tego względu do celów energetycznych przydatne są gatunki roślin o dużej zawartości w biomacie energii chemicznej [157, 158], a zwłaszcza charakteryzujące się korzystnym bilansem energetycznym, czyli różnicą pomiędzy energią zawartą w biomacie a energią potrzebną do jej wytworzenia [157, 158, 325]. Takie rośliny pozwalają na ciągłą dostawę substratu do biogazowni oraz dużą konwersję energii w formie biogazu o wysokiej zawartości metanu [112].

Obecnie najczęściej stosowanym substratem w biogazowniach rolniczych w Europie jest kiszunka z kukurydzy. Wynika to z jej ogólnej dostępności, wysokiej wydajności biogazu oraz stabilnego przebiegu procesu fermentacji [90, 268, 339]. Chociaż kukurydza jest doskonałym komponentem do produkcji biogazu, to należy szukać dla niej surowców alternatywnych, m.in. ze względu na konieczność stosowania w uprawie roślin poprawnego zmianowania, zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego kraju i rosnących cen tego surowca na rynku [89, 268]. Produkcja kukurydzy jako surowca energetycznego nie może prowadzić ani uzasadniać monokultury w produkcji roślinnej.

Rozwój sektora odnawialnych źródeł energii jest wyzwaniem i szansą dla obszarów wiejskich [111]. Rola rolnictwa w rozwoju sektora odnawialnych źródeł energii nie musi ograniczać się tylko do produkcji surowca energetycznego, lecz powinna obejmować również przetwarzanie tego surowca. Wobec rosnących kosztów produkcji i spadającej jednostkowej opłacalności produkcji roślinnej i zwierzęcej może być on doskonałym źródłem dywersyfikacji dochodów rolniczych [259, 101].

Celem badań było skwantyfikowanie przydatności biomasy wybranych gatunków roślin – kukurydzy zwyczajnej, sorga cukrowego, miskanta olbrzymiego, miskanta cukrowego oraz lucerny siewnej, rutwicy wschodniej, mieszanek bobowo-trawiastych i traw  $C_3$  – tymotki łąkowej i kupkówki pospolitej – do konwersji na biogaz.

Porównano dwie technologie produkcji: konwencjonalną – wysokonakładową oraz integrowaną – o zmniejszonych nakładach na przemysłowe środki produkcji w stosunku do konwencjonalnej.

Zastosowane w badaniach taksony roślin oraz agrotechnologie porównano w trzech wymiarach:

- rolniczym (plon biomasy naturalnej, suchej masy oraz masy kiszonkowej);
- energetycznym (nakłady i uzysk skumulowanej energii w plonie, sprawność energetyczna, wydajność biogazu i jego skład);
- ekonomicznym (nakłady finansowe na produkcję, wartość pieniężna plonu i ekonomiczna efektywność produkcji biomasy).

W hipotezie badawczej (1) przyjęto, że kukurydza zwyczajna jako surowiec żywnościowy i energetyczny nie może tworzyć monokultury agrocenoz i być jedynym surowcem. Dlatego szukano wśród traw o typie fotosyntezy  $C_4$  gatunków o porównywalnej wydajności biomasy – zakwalifikowano sorgo cukrowe, miskant olbrzymi i cukrowy. Gatunki bobowe i trawy  $C_3$  wybrano jako przyjazne środowisku, pożądane w agrocenozach oraz wydajne pod względem biomasy.

Hipoteza badawcza (2) zakłada, że technologie wysokonakładowe (konwencjonalne) uwydatniają potencjał plonowania gatunków (mierzony wydajnością biomasy i energii) przy dużej energochłonności produkcji. Technologie integrowane racjonalizują zużycie najbardziej energochłonnych czynników produkcji (nawozów i paliw) i poprawiają energetyczną sprawność produkcji biomasy na biogaz.

## **2. Przegląd piśmiennictwa**

### **2.1. Biomasa i biogaz rolniczy**

Światowa sytuacja energetyczna wymusza szersze zainteresowanie się odnawialnymi surowcami energetycznymi. W polskich warunkach za największe potencjalne źródło energii odnawialnej uważana jest biomasa. W ustawodawstwie RP dotyczącym produkcji biokomponentów i biopaliw ciekłych [348] biomasą nazywa się „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji, a w szczególności surowce rolnicze”. Biomase można wyrażać w jednostkach świeżej masy (naturalna masa organizmów) lub suchej masy (masa organizmów pozbawiona wody), przeliczać na węgiel organiczny oraz jednostki energii (MJ). Pozwala to określić ilość materii organicznej wytworzonej przez popula-

cję roślin lub zwierząt w danej przestrzeni (jednostce powierzchni) oraz czasie i stanowi miarę ich produktywności biologicznej [113].

Biomasa roślinna jest efektem reakcji fotosyntezy. W procesie tym z CO<sub>2</sub> i wody oraz składników mineralnych pobieranych z podłoża pod wpływem promieniowania słonecznego powstają organiczne związki węgla i tlen. W wyniku fotosyntezy w związkach węgla syntetyzowanych z jednego mola CO<sub>2</sub> jest akumulowane w roślinach także około 470 kJ energii chemicznej użytecznej dla człowieka [206]. Wprawdzie produktem ubocznym zamiany energii chemicznej biomasy na energię cieplną, elektryczną czy mechaniczną jest ponownie CO<sub>2</sub>, ale jego bilans w przyrodzie jest korzystny, gdyż przez proces fotosyntezy może krążyć w obiegu zamkniętym i być ponownie wykorzystywany do odtwarzania biomasy. Produkcja biomasy jest więc procesem odnawialnym, a czas jej odtwarzania w przyrodzie, czyli obiegu CO<sub>2</sub>, waha się, w zależności od gatunku rośliny, od kilku miesięcy (rośliny jednoroczne) do kilkudziesięciu nawet lat (rośliny drzewiaste) [158, 206].

Elementarnymi składnikami biomasy są węgiel (C), tlen (O), wodór (H) i azot (N), na które przypada od 87 do 97% suchej masy. Z pierwiastków tych zbudowana jest substancja organiczna, czyli węglowodany, białka i tłuszcze. Zawartość składników organicznych w biomase wykorzystywanej do celów biogazowych jest zróżnicowana. Wynika to głównie z cech gatunkowych roślin i technologii ich produkcji, ale też wielu innych czynników, np. warunków glebowych czy opadowo-termicznych w okresie wegetacji. Każda biomasa składa się z suchej masy i wody. W skład suchej masy wchodzi również składniki mineralne, ale nie są zaliczane do substancji organicznej. O przydatności biomasy do fermentacji metanowej decyduje przede wszystkim zawartość i dostępność dla drobnoustrojów składników organicznych w suchej masie oraz ich wzajemny stosunek [232, 268]. W biogazowniach wydajność metanu determinuje budowa i skład chemiczny poszczególnych struktur węglowodanów nieskrobiowych (celulozy, hemicelulozy) i towarzyszącej im ligniny [163]. Celuloza jest nierozgałęzionym biopolimerem zbudowanym z cząsteczek złożonych z kilkunastu, a nawet kilkuset tysięcy jednostek glukozy połączonych wiązaniami  $\beta$ -1,4-glikozydowymi. Stanowi ona podstawowy składnik ścian komórkowych. Hemiceluloza jest niejednorodną grupą polimerów cukrów prostych lub ich pochodnych połączonych wiązaniami  $\beta$ -glikozydowymi i tworzy rozgałęzione łańcuchy. Lignina jest substancją lepiszczową, polimerem tworzonym przez monomery związków organicznych, będących pochodnymi aromatycznych alkoholi fenolowych. Nie jest degradowana przez mikroorganizmy w procesie fermentacji. Jej nadmiar w substratach utrudnia rozkład węglowodanów nieskrobiowych i obniża wydajność biogazu.

Wzrost udziału biomasy w wytwarzaniu energii odnawialnej nie będzie możliwy bez zwiększenia arealu upraw roślin energetycznych. Wysoką wydaj-

ność biomasy można uzyskać tylko z tzw. upraw celowych (dedykowanych), czyli specjalnie założonych plantacji wysokowydajnych, jednorocznych i wieloletnich roślin energetycznych [104]. Wyznacznikiem opłacalności produkcji roślin do celów biogazowych jest plon biomasy z jednostki powierzchni oraz uzysk biogazu. Plon biomasy jest wypadkową potencjału genetycznego roślin, układu warunków glebowo-klimatycznych, poziomu stosowanej agrotechniki oraz interakcji tych czynników. Gatunki roślin przydatne do celów energetycznych różnią się jednak wydajnością biomasy i zawartą w niej energią chemiczną [157, 158]. Z badań wielu autorów [44, 196, 232, 328, 329] wynika, że w polskich warunkach z roślin jednorocznych najbardziej wydajną jest kukurydza z plonem suchej masy wahającym się od 14,9 do 22,7 t · ha<sup>-1</sup>. Rośliną dorównującą kukurydzy pod względem produkcji biomasy jest sorgo cukrowe. Jego plony suchej masy mogą wynosić od 12,5 do 23,4 t · ha<sup>-1</sup> [45, 148, 196, 245, 311, 329, 343].

Z roślin wieloletnich wysoki potencjał plonowania mają rośliny bobowe (motylkowe) drobnonasienne. W badaniach licznych autorów [29, 84, 139, 140, 155, 176, 249, 278, 302, 320, 321, 362, 363, 368] plony suchej masy tych roślin wynosiły od 6,8 do 23,1 t · ha<sup>-1</sup>, w zależności od gatunku i poziomu agrotechniki. Należy podkreślić, że w porównaniu z innymi roślinami plony wieloletnich roślin bobowych uzyskuje się przy znacznie niższych nakładach na uprawę, wynikających z mniejszego nawożenia azotem, spowodowanego ich symbiozą z bakteriami z rodzaju *Rhizobium* i *Bradorhizobium* wiążącymi wolny azot z powietrza. Z tego względu rośliny te zapewniają też korzystny wpływ pozostawianych resztek pozbiorowych na żyzność gleby dla roślin następczych [359].

Wysoką wydajnością biomasy z jednostki powierzchni cechują się również uprawiane w płodozmianach polowych w siewie monogatunkowym trawy rodzimego pochodzenia zaliczane do cyklu fotosyntezy C<sub>3</sub>. Plony suchej masy tych roślin mieszczą się w przedziale od 6,9 do 18,3 t · ha<sup>-1</sup> [103, 155, 329]. W warunkach krajowych znacznie wyższą wydajność biomasy zapewniają natomiast gatunki traw olbrzymich należące do cyklu fotosyntezy C<sub>4</sub> [173]. Miskant olbrzymi w pełni użytkowania pozwala uzyskać plon suchej masy od 18 do 30 t · ha<sup>-1</sup> [44, 183, 271], a plony suchej masy miskanta cukrowego wahają się od 5 do 30 t · ha<sup>-1</sup> [44, 182]. Plony suchej masy roślin bobowatych wieloletnich z trawami cyklu C<sub>3</sub> (koniczyny łąkowej z trawami i lucerny siewnej z trawami) mieszczą się w przedziale od 8,7 do 25,6 t · ha<sup>-1</sup> [18, 29, 155, 249].

Produkcja rolnicza na cele energetyczne powinna być optymalizowana pod względem efektów energetycznych [293]. Przy wykorzystaniu surowców rolniczych do celów energetycznych ważna jest nie tylko wydajność energii uzyskana w biomacie pozyskiwanej z 1 ha, ale i nakłady energii ponoszone na



jej uprawę, zbiór, transport czy przetwarzanie [154]. Dlatego do produkcji biogazu nadają się gatunki o wysokiej produktywności biomasy z jednostki powierzchni, a zwłaszcza te charakteryzujące się korzystnym bilansem energetycznym, czyli różnicą pomiędzy energią zawartą w biomasie a energią potrzebną do jej wytworzenia [157, 158, 325]. Największą efektywność produkcji energii z biomasy gwarantują wieloletnie rośliny energetyczne, gdzie wskaźnik sprawności energetycznej uprawy (wyrażony stosunkiem wartości energetycznej uzyskanego plonu biomasy do sumarycznych nakładów energetycznych poniesionych na jej produkcję) jest kilku- lub kilkunastokrotnie większy niż u roślin jednorocznych. W badaniach Szemplińskiego i Dubisa [329] z analizowanych kilku gatunków roślin najwyższy wskaźnik efektywności energetycznej zapewniały (w kolejności): koniczyna czerwona z tymotką (20,9), kukurydza (18,4), lucerna z tymotką (16,0) i kupkówka pospolita (12,0), a najniższy – mieszaniec sorga cukrowego z trawą sudańską (6,6), sorgo cukrowe (7,5) oraz tymotka łąkowa (8,3).

Biogaz w biogazowniach rolniczych można produkować z biomasy różnego pochodzenia [114]. Zgodnie ze znowelizowanymi w 2011 roku zapisami w prawie energetycznym [347] biogaz rolniczy to „paliwo gazowe otrzymywane w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, z wyłączeniem gazu pozyskiwanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów”. Ustawa precyzuje tym samym katalog substratów możliwych do wykorzystania w biogazowni rolniczej, chociaż na pierwszej pozycji wymienia surowce rolnicze. Podstawowym kryterium doboru surowców roślinnych do produkcji biogazu powinien być ich plon suchej masy z jednostki powierzchni, zawartość łatwo fermentujących składników chemicznych oraz możliwość magazynowania i przechowywania zebranej biomasy [267]. Dlatego w obszarze zainteresowań biogazowni rolniczych są przede wszystkim surowce o dużym potencjale energetycznym, warunkujące duże uzyski biogazu i stabilność procesu fermentacji [253].

Do produkcji biogazu najlepiej nadają się substraty roślinne zakonserwowane przez zakiszanie. Kiszenie jest procesem biochemicznym polegającym na rozkładzie cukrów prostych do kwasu mlekowego w procesie kontrolowanej fermentacji mlekowej. Kiszoncek zabezpieczają ciągłość podaży substratu roślinnego do produkcji biogazu zwłaszcza w okresie zimowym [104, 268]. W celu prawidłowego przebiegu procesu zakiszania zielonek można dodawać preparaty mikrobiologiczne (tzw. inokulanty) stymulujące proces fermentacji mlekowej i poprawiające tlenową stabilność kiszzonek. Zawierają one szczepy bakterii mlekowych heterofermentacyjnych, które oprócz kwasu mlekowego wytwarzają też kwas octowy. Dlatego prawidłowy przebieg procesu zakiszania, poza

konserwacją substratu, prowadzi również do wstępnej biodegradacji polisacharydów, czyli jest wstępnym etapem kondycjonowania substratu do biogazowni [199]. W procesie fermentacji metanowej kwas octowy z kiszonki jest bezpośrednio wykorzystywany do produkcji metanu [267]. Kiszonki zapewniają bardzo stabilny skład chemiczny surowca dostarczanego do komory fermentacyjnej, co umożliwia stabilny proces fermentacji przez bakterie metanowe. Nie jest tego w stanie zapewnić naturalna biomasa z bieżącego zbioru ze względu na zmieniający się udział składników chemicznych w surowcu, wynikający z biologii rozwoju roślin. Siano jest gorszym substratem do produkcji biogazu niż kiszonka, gdyż wysuszone rośliny są gorzej fermentowane [267, 268].

O przydatności roślin do produkcji biogazu, oprócz plonu biomasy, decyduje także jednostkowa wydajność biogazu oraz zawartość w nim metanu [103]. Na wydajność biogazu ma wpływ wiele czynników. Należą do nich m.in. zmienność gatunkowa i odmianowa roślin, zawartość suchej masy oraz składników chemicznych w substracie, a nawet intensywność uprawy czy lokalizacja plantacji [167]. Groblichhoff i in. [119] wykazali, że istnieje istotna zależność między produkcją biogazu a zawartością składników chemicznych w substracie. Produkcja biogazu jest dodatnio skorelowana z zawartością włókna surowego, bezazotowych związków wyciągowych oraz węglowodanów rozpuszczalnych w wodzie, natomiast ujemnie koreluje z zawartością białka ogólnego oraz popiołu surowego. Ponieważ zawartość składników chemicznych w roślinach zmienia się wraz z fazą rozwojową, do produkcji biogazu zdecydowanie lepiej nadają się substraty zbierane w zaawansowanych niż w młodocianych fazach rozwojowych. Na przykład trawy największym uzyskiem metanu cechują się w fazie strzelania w źdźbło i wysuwania wiech (kłoszenia) [351].

Wydajność biogazu limituje proces hydrolizy substratu, a ta przebiega intensywniej, gdy bakterie powodujące hydrolizę mają większy dostęp i powierzchnię działania enzymów. W procesie fermentacji metanowej biodegradowalność biomasy ograniczają związki polimerowe, np. celuloza. Struktura chemiczna celulozy ogranicza penetrację mikroorganizmów rozkładających ten polisacharyd, a dodatkowym utrudnieniem jest towarzysząca jej lignina, której długi okres biodegradacji wyklucza ten składnik jako substrat w biogazowni [104]. Efektywność metanogenezy można zwiększyć przez rozdrobnienie substratu. Badania Fugol i Praska [89] wykazały, że forma kiszonki (rozdrobniona i nierozdrobniona) ma wpływ na uzysk biogazu. W przypadku kukurydzy i traw rozdrobnienie kiszonki zapewniało wyższy uzysk biogazu w porównaniu z formą nierozdrobnioną. Odwrotnie było w przypadku lucerny, gdzie kiszonka nierozdrobniona dała wyższą wydajność biogazu niż rozdrobniona. Spośród trzech testowanych kiszonek najwyższą wydajność biogazu uzyskano z nierozdrobnionej kiszonki z lucerny, a najniższą z nierozdrobnionej kiszonki z traw.

Rozdrobnione kiszonki charakteryzowały się wyższym uzyskiem biogazu (w kolejności): kukurydza –  $635 \text{ ln} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , trawy –  $595 \text{ ln} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  niż te same kiszonki nierozdrobnione (odpowiednio 544 i  $536 \text{ ln} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ ). Uzysk biogazu z nierozdrobnionej kiszonki lucerny wynosił  $645 \text{ ln} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , a z rozdrobnionej –  $567 \text{ ln} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  Wprawdzie uzysk biogazu z 1 kg s.m.o. kiszonki z lucerny nierozdrobnionej był najwyższy, ale zawartość w nim metanu była najniższa i wynosiła 64,9%.

Biogaz, zwany gazem błotnym lub gnilnym, powstaje zarówno w warunkach naturalnych, jak i kontrolowanych w procesie biodegradacji substancji organicznej w warunkach beztlenowych (anaerobowych) bez dostępu światła przez bakterie fermentacji metanowej [112, 207, 268, 323, 340]. Mikrobiologiczny proces powstawania biogazu, którego głównym składnikiem jest metan, odbywa się w przyrodzie samoczynnie od miliardów lat [83, 298]. Stanowi ważny element biogeochemicznego obiegu węgla w środowisku przyrodniczym [104]. Metan,  $\text{CO}_2$  i inne gazy powstające podczas niekontrolowanej fermentacji metanowej ulatniają się do atmosfery ziemskiej i powodują tzw. efekt cieplarniany [14, 99, 113, 171, 206, 333]. Metan przyczynia się do uszkodzania warstwy ozonowej stratosfery, odpowiedzialnej za ochronę przed promieniowaniem ultrafioletowym (UV), w znacznie większym stopniu niż  $\text{CO}_2$  [104, 290, 333].

Kontrolowane wykorzystanie bakterii do produkcji biogazu i jego energetyczne przetwarzanie do ciepła i energii elektrycznej zaczęło się stosunkowo niedawno. Najbardziej technicznie zaawansowane instalacje produkujące biogaz, zwane biogazowniami rolniczymi, zaczęły powstawać w połowie lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku w Niemczech i Danii [83]. Współczesne biogazownie są adaptacją naturalnego mechanizmu degradacji substancji organicznej do biogazu prowadzonej w cyklu zamkniętym w specjalnie do tego przystosowanych instalacjach fermentacyjnych [83, 104, 129, 246, 253, 268, 340]. W założeniach programu rozwoju biogazowi na substancje pochodzenia rolniczego [371] podano, że przez biogazownię rozumie się zespół obiektów, urządzeń i instalacji służących do wytwarzania biogazu, a przez siłownię biogazową – biogazownię wyposażoną w urządzenia do produkcji energii elektrycznej i ciepłej z wytworzonego biogazu. Znowelizowana ustawa o prawie energetycznym [347] nazywa biogaz rolniczy paliwem gazowym otrzymywanym z surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych lub pozostałości przemysłu rolno-spożywczego lub biomasy leśnej w procesie fermentacji metanowej.

Proces fermentacji biomasy w biogazowniach rolniczych zachodzi przy współudziale licznych bakterii metanogennych zaliczanych do archeowców (*Archaeobacteriales*), najstarszych organizmów żyjących na kuli ziemskiej. Mają one szczególnie wyspecjalizowany metabolizm. Cechują się bardzo powol-

nym rozwojem i dużą wrażliwością na zmiany warunków siedliskowych, takich jak temperatura i wartość pH. Dotychczas wyizolowano ponad 40 szczepów bakterii metanogennych. Ich mikroskopowy obraz ma postać pałeczek, spirali czy ziarniaków [340]. Produkcja biogazu z biomasy ma przed sobą ogromną przyszłość, ponieważ może ograniczyć emisję metanu do środowiska przyrodniczego, która zachodzi podczas procesów biochemicznych towarzyszących składowaniu produktów i odpadów rolniczych, np. gnojowicy czy obornika [206, 332, 334].

Wytwarzanie biogazu jest łańcuchowym procesem biochemicznym składającym się z dwóch zasadniczych faz – fermentacji kwaśnej i metanowej [104]. W fazie fermentacji kwaśnej wyróżnia się etap hydrolizy i kwasogenezy, a w fazie metanowej – etap octowy i metanogenezy. Kinetyka przebiegu tych procesów zależy od rodzaju podłoża (substratu) i jego jakości chemicznej oraz czynnika biologicznego, czyli biofermentu bakteryjnego [167]. Szybkość wytwarzania biogazu jest często proporcjonalna do zawartości substancji chemicznych powstających w poszczególnych etapach fermentacji. Zachwianie jednego etapu fermentacji powoduje zmiany w kolejnych. Każdy jej etap zachodzi przy udziale innej grupy mikroorganizmów, częściowo wzajemnie powiązanych, chociaż wykazujących odrębność wymagań co do warunków środowiska [99, 104, 163, 223, 242, 268, 298, 333].

Fermentację kwaśną (oba jej etapy) prowadzą bakterie hydrolizujące związki organiczne. Dominują w niej beztlenowce obligatoryjne (*Bacillus*, *Pseudomonas*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*) i fakultatywne (*Streptococcus*, *Enterobacterium*). Niektóre z nich mogą być bezwzględnie beztlenowcami (*Aerobacter*, *Lacobacillus*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*). Pierwszy etap tego procesu to hydroliza. Polega na rozkładzie złożonych polimerowych związków organicznych do monomerów. Związki chemiczne o dużych łańcuchach węglowych są rozkładane do związków o łańcuchach coraz krótszych. Bakterie hydrolityczne stopniowo degradują materię organiczną na mniejsze fragmenty przez wytwarzane enzymy, takie jak celulaza, celobiaza, ksylanaza, amylaza, lipaza czy proteaza. Rozkładają one złożone związki organiczne znajdujące się w substracie (węglowodany, białka, tłuszcze) do prostych związków organicznych. W wyniku reakcji biochemicznych białka ulegają hydrolizie do aminokwasów, tłuszcze do alkoholi oraz niskocząsteczkowych ( $C_1$ – $C_6$ ) i wielowodorotlenowych kwasów tłuszczowych (do  $C_{15}$ ), a węglowodany (w tym celuloza) do dwu- i monocukrów. Na przykład celuloza rozkładana jest do glukozy i celobiozy. Produkty hydrolizy są prekursorem do tworzenia metanu w fazie metanogenezy. Biomasa podczas tego etapu przemienia się w pulpę.

Etap drugi to fermentacja kwaśna (kwasogeneza, acidogeneza), w której rozkładane są głównie węglowodany. Związki azotowe są rozkładane dopiero w fermentacji metanowej, a przejściowym produktem tego rozkładu jest amo-

niak. Produkty hydrolizy powstałe w poprzednim etapie są przetwarzane przez bakterie acidogenne. Metabolizują one głównie krótkołańcuchowe kwasy organiczne (76%) składające się z kilku atomów węgla, takie jak np. kwas mrówkowy, octowy, propionowy, masłowy, walerianowy, kapronowy, oraz alkohole (metanol, etanol) i aldehydy, a także niewielkie ilości siarkowodoru, CO<sub>2</sub> czy wodoru. Część hydrolizatów (około 20%) jest degradowana także bezpośrednio do octanów. Produkty kwasogenezy zmieniają warunki środowiska, a odczyn fermentowanego roztworu staje się kwaśny (pH 4,5–6,3). W procesie tym wydziela się intensywny zapach, co ma związek z powstawaniem lotnych kwasów tłuszczowych. Niektóre bakterie biorące udział w tym etapie zużywają tlen pozostały po procesie acidogennym, przez co stwarzają dogodne warunki dla beztlenowców obligatoryjnych. Część produktów kwasogenezy staje się źródłem energii i węgla dla bakterii acetogennych.

Produkty powstałe podczas fermentacji kwaśnej są substratem dla bakterii trzeciego etapu, zwanego fermentacją octową (octanogeneza, acetogeneza). Uczestniczą w niej liczne szczepy bakterii octanowych, takich jak *Acetobacterium woodii* i *Clostridium aceticum* – produkujące wodór, swoiste bakterie odpowiedzialne za produkcję octanów, m.in. *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*, czy redukujące siarczany, np. *Desulfovibrio*, *Desulfomaculum*. Przetwarzają one lotne kwasy tłuszczowe o krótkich łańcuchach węglowych (C<sub>3</sub>–C<sub>6</sub>), tj. kwasy organiczne, alkohole, aldehydy, ketony, głównie do kwasu octowego (octanów) oraz CO<sub>2</sub> i wodoru, czyli w substancje będące bezpośrednim substratem do produkcji metanu. Czas generacji bakterii acetogennych jest stosunkowo długi i wynosi nawet 85 godzin.

W czwartym etapie fermentacji, zwanym metanogenezą, wytwarzany jest biogaz. Uczestniczą w tym liczne gatunki bakterii metanowych, bezwzględnych beztlenowców, które wymagają obojętnego odczynu substratu. Należą do nich m.in. *Methanosarcina barkeri*, *Methanococcus mazei*, *Methanosaeta* ssp., *Methanobacterium* ssp., *Methanospirillum* ssp. Podczas tego etapu fermentacji metabolizowane są produkty końcowe, głównie metan i CO<sub>2</sub>, a w niewielkich ilościach także siarkowodór i amoniak. Metan zasadniczo wytwarzany jest z kwasu octowego (prawie w 70%), ale też z mrówczanów, metanolu, metyloaminy czy siarczku dimetylowego, a pozostała jego ilość (około 30%) w wyniku redukcji ditlenku węgla (CO<sub>2</sub>) wodorem (H<sub>2</sub>).

Fermentacja metanowa jest procesem labilnym, uzależnionym od czynników zewnętrznych i wewnętrznych, m.in. rodzaju bakterii beztlenowych, temperatury, odczynu, rodzaju i postaci substratu (stała, ciekła, półciekła), zawartości w nim składników organicznych, inhibitorów i substancji toksycznych [268, 298].

Proces fermentacji, oprócz wyspecjalizowanych rodzajów bakterii biorących udział w przemianie materii, wymaga też określonej temperatury. Procesy

metanogenne zachodzą w przyrodzie w temperaturze od 4 do 98°C [99, 171]. Niewłaściwy zakres temperatury może spowodować zahamowanie tego procesu z uwagi na odmienne wymagania termiczne szczepów bakteryjnych. Wprawdzie wzrost temperatury przyspiesza procesy rozkładu związków chemicznych, jednak maksymalna temperatura jest zdeterminowana cechami mikroorganizmów, a jej przekroczenie powoduje spadek szybkości reakcji lub jej zahamowanie w wyniku denaturacji ich białek [340]. Bakterie metanowe, ze względu na zakres ich wymagań termicznych, dzieli się na bakterie psychrofilne, mezofile i termofilne [298]. Większość bakterii metanowych to mezofile, których optymalne zakresy temperatury, w aspekcie technologii produkcji biogazu, wynoszą od 32 do 42°C. Ponieważ szczepy bakterii są wrażliwe na wahania temperatury, w instalacjach biogazowych zmiany te nie powinny przekraczać przedziału 2–6°C [333, 340]. Bakterie metanowe w procesie rozkładu materii organicznej wytwarzają mało ciepła, stąd nie wystarcza go do uzyskania wymaganej temperatury fermentacji. Do uzyskania relatywnie wysokiego uzysku biogazu wymagane jest podgrzewanie fermentowanej substancji, czyli dostarczenie ciepła z zewnątrz. W praktyce instalacje mezofilne są najbardziej rozpowszechnioną metodą produkcji biogazu rolniczego. Fermentacja przez termofilne kultury bakterii wymaga działania temperatury od 50 do 57°C. Taka fermentacja zapewnia wysoki uzysk biogazu, ale wymaga dużych nakładów energii ze względu na podgrzewanie podłoża do optymalnego zakresu aktywności bakterii. Dla bakterii psychrofilnych optymalny zakres rozwoju i aktywności wynosi około 20–25°C, jednak w takiej temperaturze skuteczność rozkładu substancji organicznej do metanu jest powolna, a produkcja biogazu ograniczona [298]. Wszystkie rodzaje bakterii metanowych są bardzo wrażliwe na zmianę substratu czy składu chemicznego, stąd każda jego zmiana powoduje osłabienie stabilności procesu fermentacji. Czas generacji bakterii mieści się w granicach od 15 do 85 godzin, a okres ich adaptacji do nowych warunków trwa około 2 tygodni. Właściwą fermentację i odpowiedni poziom produkcji biogazu zapewnia tylko stabilny skład substratu [268, 340].

Prawidłowy przebieg rozwoju bakterii i procesu fermentacji zależy od właściwego odczynu (pH). Bakterie uczestniczące w poszczególnych etapach fermentacji, podobnie jak w przypadku temperatury, wymagają różnych jego zakresów. Dla bakterii hydrolizujących i kwasotwórczych optymalny odczyn pH wynosi od 4,5 do 6,3. Nie są to jednak wartości bezwzględne i mogą one przeżyć również w warunkach nieco wyższego pH, jednak ich aktywność będzie znacznie mniejsza. W przypadku bakterii odpowiedzialnych za wytwarzanie kwasu octowego i metanu środowisko ich rozwoju musi posiadać odczyn w wąskim zakresie pH – od 6,8 do 7,5. Jeśli fermentacja odbywa się tylko w jednej komorze fermentacyjnej to pH musi być ustalone w tym zakresie [298]. Spadek pH

poniżej tych wartości ogranicza działalność metanogenów i wymaga natychmiastowego zatrzymania podaży świeżych substratów w celu umożliwienia bakteriom metanowym rozłożenia kwasu octowego, a dokładniej metabolizowania z niego metanu [340]. Z kolei wzrost pH powyżej 8 może oznaczać zwiększone gromadzenie się w bioreaktorze metabolitów w formie  $\text{NH}_3$ , które stają się szkodliwe dla bakterii metanowych. Prawidłowy przebieg fermentacji zależy od czasu generacji mikroorganizmów. W początkowych trzech etapach może wynosić kilkanaście minut przy degradacji związków łatwo rozpuszczalnych (np. węglowodanów prostych) i kilka dni przy degradacji węglowodanów złożonych (np. celulozy) czy białek i tłuszczów. Czas namnażania się bakterii metanogennych może wynosić od kilkudziesięciu do nawet kilkuset godzin [104].

Przemiany biochemiczne zachodzące podczas powstawania biogazu są uzależnione od rodzaju i ilości składników organicznych (węglowodanów, białek i tłuszczu) znajdujących się w suchej masie wsadu. Zawartość tych składników w substracie oraz wzajemny ich stosunek decyduje o szybkości namnażania się bakterii w komorze fermentacyjnej. Podczas zgazowania w fermentatorze (bioreaktorze) powinien znajdować się wsad o zawartości 11–15% suchej masy, co wymaga zużycia dużej ilości wody i wynika z możliwości jego pneumatycznego transportu oraz mieszania, a taka fermentacja określana jest jako „mokra”. Biogaz można też uzyskiwać w procesie fermentacji „suchej”, a zawartość suchej masy we wsadzie mieści się w przedziale 16–40% [268, 340]. Do uzyskania w fermentatorze prawidłowego rozwoju anaerobowych szczepów bakteryjnych powinna być zapewniona nie tylko odpowiednia ilość składników pokarmowych w pożywce, ale też pierwiastków śladowych, takich jak żelazo, nikiel, kobalt, selen, molibden, wolfram, koniecznych do właściwego wzrostu bakterii. Fermentowana materia organiczna nie może też zawierać inhibitorów ani substancji szkodliwych wprowadzonych razem z substratem (m.in. soli i metali ciężkich, antybiotyków, środków chwastobójczych), a nawet nadmiernych ilości metabolitów fermentacji (np.  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ), mogących działać toksycznie na bakterie lub osłabiać procesy mikrobiologiczne.

Proces powstawania metanu w komorze fermentacyjnej można porównać do procesów fermentacyjnych przebiegających w żwaczu przewodu pokarmowego przeżuwaczy. Bakterie metanowe w fermentatorze reagują na błędy „żywniowe”, podobnie jak zwierzęta, spadkiem wydajności metanu lub zahamowaniem całego procesu fermentacyjnego [268, 298]. Intensywność fermentacji metanowej zależy od rodzaju i ilości składników organicznych znajdujących się w substracie (węglowodany, białka, tłuszcze) oraz szybkości powstawania produktów pośrednich w poszczególnych etapach. Najszybciej fermentowane są węglowodany proste i oligosacharydy (np. jednocukry i skro-

bia), wolniej węglowodany złożone (np. celuloza, hemiceluloza), dopiero później białka, a najwolniej tłuszcze. Szybkość wytwarzania biogazu najpierw limituje etap hydrolizy, a następnie przebieg fermentacji kwaśnej, a ta powinna odpowiadać poziomowi fermentacji metanowej. Taki przebieg tego procesu wynika z faktu, że metabolity jednej fazy stanowią substraty dla mikroorganizmów kolejnej fazy. Ograniczenie przebiegu fermentacji metanowej wywołuje nagromadzenie się substratów fermentacji kwaśnej i zakwaszenie środowiska (poniżej pH 7), przez co może być zahamowany rozwój bakterii metanowych wrażliwych na niskie pH [268, 340].

O stabilności przebiegu procesu fermentacji metanowej decyduje przede wszystkim stosunek węgla do azotu (C:N), czyli ilość pożywki niezbędnej do wzrostu i namnażania się w fermentatorze populacji bakterii. Pierwiastki te stanowią źródło energii i materiał budulcowy dla szczepów bakteryjnych. Zbyt szeroki stosunek C:N oznacza wzrost zawartości węgla i zmniejszenie azotu (rozluźnienie stosunku C:N). W takich warunkach azot jest szybko zużywany przez bakterie metanowe. Uniemożliwia to całkowitą przemianę węgla, a przez to uzyskanie pełnego potencjału produkcji metanu. Nadmiar azotu prowadzi z kolei do powstawania amoniaku ( $\text{NH}_3$ ), który staje się inhibitorem i nawet w niewielkich stężeniach hamuje wzrost bakterii lub może spowodować zniszczenie całej ich populacji. Do prawidłowego przebiegu procesu fermentacji metanowej stosunek C:N powinien wynosić jak 10–30:1 [298]. Za wartość optymalną przyjmuje się stosunek C:N jak 15:1 [268]. Szlachta [333] podaje, że wynika to z faktu, iż około 15% węgla z fermentowanego złoża jest asymilowane przez bakterie, z tego względu stosunek C:N nie powinien przekraczać 100:3. Aby zapewnić bakteriom właściwe warunki do rozwoju, pożywka powinna zawierać substancje pokarmowe C:N:P:S w proporcji 600:15:5:1 [298]. W badaniach Fugol i Praska [89] stosunek C:N w kiszonce z kukurydzy wynosił 33:1, w kiszonce z traw 30:1, a w kiszonce z lucerny 18:1. Choć wartości te mieszczą się w granicach normy, to kiszonka z lucerny pod tym względem wypadła gorzej niż pozostałe kiszonki z powodu znacznie większej ilości azotu w suchej masie lucerny. Duża zawartość białka w substracie stanowi zagrożenie dla stabilności procesu fermentacji metanowej i produkcji biogazu [167].

Decydujący wpływ na intensywność fermentacji w reaktorze zależy od zawartości węglowodanów strukturalnych, czyli włókna surowego i jego poszczególnych frakcji. Dlatego substraty zawierające dużo substancji organicznych w postaci polisacharydów, takich jak celuloza i hemiceluloza, limitują szybkość fermentacji metanowej przez wolno przebiegającą ich hydrolizę [104]. Podkówka i Podkówka [267] podają, że istnieje istotna zależność między poziomem zawartości włókna kwaśno-detergentowego (ADF) a ilością wyprodukowanego metanu. Natomiast frakcja włókna neutralno-detergentowego



(NDF), w skład której wchodzi takie substancje jak hemiceluloza, celuloza czy lignina, ulega powolnym przemianom biochemicznym i ogranicza powstawanie metanu. Z tego względu surowce mocno zdrewniałe lub dojrzałe, zawierające dużo zliżnifikowanych węglowodanów strukturalnych typu NDF, dają mniejszą wydajność metanu. Według Majtkowskiego i in. [222] trawy olbrzymie cyklu fotosyntezy  $C_4$  zawierają wyższy poziom tych związków niż trawy  $C_3$ .

Powstający w procesie fermentacji różnych rodzajów biomasy biogaz jest mieszaniną głównie metanu i ditlenku węgla oraz innych gazów występujących w małych lub śladowych ilościach. Podkówka i Podkówka [268] podają, że biogaz zawiera objętościowo: 45–75% metanu ( $CH_4$ ), 25–45% ditlenku węgla ( $CO_2$ ), 2–7% wody ( $H_2O$ ),  $\leq 2\%$  azotu ( $N_2$ ),  $\leq 1\%$  tlenu ( $O_2$ ),  $\leq 1\%$  wodoru ( $H_2$ ),  $\leq 0,5\%$  tlenku węgla ( $CO$ ) oraz 20–20 000 ppm siarkowodoru ( $H_2S$ ). W wyniku prawidłowo przebiegającego procesu fermentacji uzyskuje się biogaz zawierający średnio około 65% metanu ( $CH_4$ ) oraz około 35%  $CO_2$  [1, 233]. Z fermentacji węglowodanów uzyskuje się biogaz o stosunku  $CH_4$  do  $CO_2$  jak 1:1. Wyższą zawartość metanu w biogazie uzyskuje się z tłuszczu, a najwyższą z białka [268]. W badaniach Fugol i Praska [89] z porównywanych substratów najwyższy uzysk metanu zapewniała niezbić kiszonka z kukurydzy, następnie z traw oraz lucerny.

Powstawanie metanu jest procesem, w którym wydziela się mało ciepła, co oznacza, że około 90% energii zawartej w fermentowanych substancjach zakumulowane jest w tym składniku biogazu [268]. Biogaz jest gazem łatwo palnym i wybuchowym. Przy stężeniu metanu w biogazie w granicach 5–15% w połączeniu z powietrzem powstaje mieszanina wybuchowa [206]. Do wykorzystywania jako źródło energii musi zawierać minimum 45% metanu [266]. Wartość energetyczna biogazu waha się od 16,7 do 26,0  $MJ \cdot m^{-3}$  (średnio 21,5  $MJ \cdot m^{-3}$ ) i zależy od zawartości metanu [267, 290, 333]. Energia zawarta w 1  $m^3$  biogazu odpowiada 0,93  $m^3$  gazu ziemnego, 0,63  $dcm^3$  oleju napędowego, 1,24 kg węgla kamiennego czy 9,4 kWh energii elektrycznej [206, 267]. Braun [35] podaje, że w 1  $m^3$  biogazu skumulowane jest 5,3 kWh energii chemicznej. Ze spalania takiej ilości biogazu można uzyskać 2,1 kWh energii elektrycznej, 2,4 kWh energii cieplnej, a straty energii w tym procesie wynoszą 0,8 kWh. Wartość opałowa czystego metanu to 35,7  $MJ \cdot m^{-3}$  [171, 268]. Do spalania 1  $m^3$  potrzeba 2  $m^3$  tlenu, co oznacza, że przy zawartości tlenu w powietrzu atmosferycznym wynoszącym około 20% do spalania potrzeba 10  $m^3$  powietrza. Produktami spalania metanu w warunkach ograniczonej ilości powietrza są tlenek węgla, zwany czadem (silna trucizna), oraz sadza.

Fermentacja metanowa nie zapewnia całkowitej konwersji substancji organicznej do biogazu. Procesowi temu nie ulega nawet do 50% substancji organicznej ze wsadu [171]. Do produkcji biogazu nadaje się biomasa, w której udział substancji organicznej podlegającej degradacji biologicznej wynosi powy-

żej 30% [268]. Nieprzetworzone przez bakterie metanowe składniki biomasy stają się produktem odpadowym, który nosi nazwę substancji pofermentacyjnej. Przefermentowana biomasa ma postać płynnego nawozu organicznego. W jej skład wchodzi składniki humusowe i biogenne. Są to najczęściej nieprzefermentowane związki organiczne substratu, biomasa bakteryjna, nieprzetworzone metabolity, składniki mineralne i woda [268]. Substancja ta stanowi pozostałość procesu fermentacyjnego i może być magazynowana albo wykorzystywana bezpośrednio lub po dalszej stabilizacji tlenowej do nawożenia gleb jako nawóz organiczny. Poferment jako nawóz jest znacznie lepiej wykorzystywany przez rośliny niż gnojowica [244, 266, 323]. Dostępność pierwiastków dla roślin na skutek mineralizacji jest duża, co wpływa na lepszą efektywność nawożenia. W przefermentowanej substancji zniszczeniu ulegają nasiona chwastów (zmniejsza to zapotrzebowanie na środki ochrony roślin) oraz czynniki chorobotwórcze zawarte w odchodach zwierzęcych. W przypadku gnojowicy fermentacja metanowa stanowi najlepszy sposób jej utylizacji i zalicza się do tzw. recyklingu organicznego [340]. Stwarza to mniejsze zagrożenie ekologiczne dla środowiska przyrodniczego (ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych) [333] oraz znacznie (80–97%) redukuje jej odory [267, 290]. Utylizacja odpadu pofermentacyjnego wymaga opracowania odpowiedniej logistyki, m.in. zapewniania powierzchni, wyboru pól i terminarza jego stosowania czy odpowiedniego sprzętu i techniki rozlewu.

## **2.2. Energetyczna i ekonomiczna efektywność produkcji**

Ocenę efektywności produkcji roślinnej można wyrażać rachunkiem energetycznym i ekonomicznym. Bardziej racjonalne rozwiązania dotyczące wyboru technologii produkcji dają analizy energetyczne. Rolnictwo w ostatnim stuleciu z głównego dostarczyciela energii stało się jednym z ważniejszych jej konsumentów [353]. Wynika to z coraz większej intensywności produkcji, czyli zwiększania nakładów energii skumulowanej w postaci paliw, sprzętu rolniczego, nawozów czy pestycydów ponoszonych na poszczególne elementy agrotechniki [293]. Wzrost plonowania roślin jest efektem istniejącej dodatniej korelacji między wielkością plonu a poziomem nakładów energetycznych ponoszonych na jego wytworzenie. Podstawą oceny energochłonności produkcji poszczególnych płodów rolnych może być analiza porównawcza nakładów energii ponoszonych w poszczególnych operacjach technologicznych niezbędnych do wytworzenia produktu w postaci plonu końcowego [161]. Pozwala też na porównywanie wyników uzyskanych w różnym miejscu i czasie, niezależnie od zmienności cen płodów rolnych i środków produkcji [354]. Racjonalizacja

procesów produkcji powinna polegać na wyborze rozwiązań technologicznych umożliwiających uzyskanie najwyższej produkcji przy jak najmniejszych nakładach. Ważnym elementem tej oceny powinna być analiza struktury nakładów, w której udział najbardziej energochłonnych czynników produkcji winien być możliwie jak najmniejszy. Analiza energetyczna nakładów pozwala więc na wybór intensywności danej technologii produkcji.

Zwolennicy produkcji biomasy pochodzenia rolniczego zakładają uzyskiwanie plonów energii brutto na poziomie  $300 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ , jednak dobrym wynikiem jest uzyskiwanie rzeczywistego plonu energii już na poziomie  $180\text{--}190 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$  [293].

Harasim [122] podkreśla, że nowoczesne technologie produkcji roślinnej powinny dążyć do ograniczenia nakładów energetycznych ze względu na konieczność poszanowania energii i środowiska. Z tych względów coraz częściej podkreśla się konieczność stosowania w rolnictwie energooszczędnych technologii produkcji [42, 367]. Oszczędzanie energii należy poprzedzić oceną jej zużycia w postaci skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych. Intensywność produkcji mierzy się przede wszystkim wielkością nakładów ponoszonych na agrotechnikę danej rośliny, stąd im wyższe są nakłady, tym technologia jest bardziej intensywna.

W produkcji roślinnej coraz większego znaczenia nabiera ocena działalności rolniczej za pomocą wskaźnika efektywności (sprawności) energetycznej. Wskaźnik ten określa zależność pomiędzy wartością energetyczną zebranego plonu a poniesionymi na jego wytworzenie nakładami energii [262, 354]. Wskaźnik ten może być w rolnictwie wykorzystany zarówno w ocenie energochłonności poszczególnych zabiegów agrotechnicznych, jak i całych technologii produkcji. Spośród wszystkich gałęzi wytwórczości rolniczej produkcja roślinna wyróżnia się najkorzystniejszym wskaźnikiem energetycznej efektywności produkcji (od 2 do 10) [353]. Zdaniem Wielickiego [355], w przeciętnych warunkach gospodarowania efektywność 1 jednostki nakładów energetycznych ponoszonych w produkcji roślinnej powinna wynosić około 4 jednostek energii w plonie. Wskaźnik ten jest wyraźnie uzależniony od poziomu plonowania roślin, stąd im wyższy plon, tym wyższa efektywność energetyczna. Duża sprawność energetyczna produkcji roślinnej powoduje, iż na rynku odnawialnych źródeł energii coraz większe znaczenie odgrywa produkcja biomasy na cele energetyczne, w tym do produkcji biogazu.

Energochłonność produkcji roślinnej należy rozpatrywać zawsze w połączeniu z efektami produkcji [42]. Mniej nakładowe, energooszczędne technologie produkcji mają uzasadnienie wówczas, gdy nie powodują dużego spadku plonu. Z punktu widzenia energetycznej efektywności technologii obniżenie wydajności będzie tylko wówczas uzasadnione, gdy jej wartość wyrażona w jednostkach energetycznych będzie mniejsza od oszczędności energii uzyskanej na skutek ograniczenia nakładów poniesionych na daną technologię.

W urynkowanym rolnictwie przy wyborze technologii produkcji należy uwzględnić również rachunki ekonomiczne. Zmieniające się relacje cen płodów rolnych do środków produkcji zmuszają do wnikliwej analizy ekonomicznej stosowanych technologii produkcji [43]. W strukturze kosztów bezpośrednich produkcji roślinnej dominującą pozycję zajmują nawozy mineralne oraz herbicydy [151, 304], czyli czynniki produkcji w największym stopniu decydujące o plonowaniu. W celu zapewnienia konkurencyjności produkcji roślinnej konieczne staje się obniżenie kosztów jednostkowych [105]. Intensyfikacja technologii produkcji w gospodarstwach wielkoobszarowych jest wynikiem przede wszystkim zwiększania nakładów finansowych na materiały, głównie nawozy mineralne i środki ochrony roślin. Podobnie kształtują się zależności wynikające z zastosowania ciągników i maszyn, nośników energii oraz siły roboczej [151].

Zgodnie z prawem malejącej efektywności nakładów, wzrost zaangażowania środków obrotowych (kosztów zmiennych) powoduje obniżenie ich efektywności. Racjonalne gospodarowanie powinno polegać głównie na maksymalizacji dochodu, czyli stosowaniu technologii minimalizujących przeciętny koszt uzyskania jednostki produktu. Opłacalność produkcji określa bowiem iloraz wartości pieniężnej uzyskanej w produkcie finalnym do kosztów poniesionych na jego wytworzenie [122]. Decyduje o tym głównie wielkość uzyskanego plonu oraz intensywność technologii charakteryzująca koszty zmienne, odzwierciedlające głównie zużycie i koszty środków produkcji [190]. Należy podkreślić, że w produkcji roślinnej opłacalność zaangażowanych środków obrotowych jest relatywnie niska (1,09–1,66) [40]. W badaniach Klepackiego [175] wskaźnik ten w produkcji rzepaku i zbóż osiągał w latach 1993–2000 wielkość od 2 do 5.

Z badań Dobka [68] oraz Jankowskiego [151], przeprowadzonych nad uprawą energetycznego rzepaku ozimego na nasiona, wynika, że technologie konwencjonalne (wysokonakładowe) należą do bardziej kosztochłonnych i charakteryzują się wyższymi kosztami bezpośrednimi niż uproszczone średnio- i niskonakładowe technologie produkcji. Jednak koszt jednostkowy produkcji w technologiach uproszczonych przy niższym poziomie plonowania był korzystniejszy niż w technologiach wysokonakładowych [151].

W celu określenia konkurencyjności produkcji surowca kiszonkowego pochodzącego z różnych roślin przydatnych do zakiszania i produkcji biogazu konieczne są działania zmierzające do racjonalnego wykorzystania ponoszonych nakładów środków produkcji i stosowania ich optymalnego poziomu w celu obniżenia jednostkowych kosztów produkcji [105]. Technologie intensywne kosztowo powodują wzrost kosztów bezpośrednich przy zwiększeniu poziomu wydajności, co skutkuje poprawą wyróżników ekonomicznych, w tym kosztu jednostkowego. W literaturze spotkać można także badania potwierdzające większą efektywność ekonomiczną technologii uproszczonych w sto-

sunku do intensywnych [125, 247]. Takie zjawisko obserwuje się szczególnie w okresach występowania niskich cen płodów rolnych [250]. Dlatego w ocenie efektywności produkcji ekonomicznej dużą rolę odgrywa polityka cenowa prowadzona na rynku krajowym i zagranicznym [284]. Burczyk [43] uważa, że zapewnienie potrzebnej ilości biomasy na potrzeby produkcji energii będzie możliwe pod warunkiem zapewnienia opłacalnych cen dla producentów biomasy i jej odbiorców.

## 2.3. Wymagania siedliskowe i agrotechniczne traw typu C<sub>4</sub>

### 2.3.1. Kukurydza zwyczajna (*Zea mays* L.)

Rodzaj kukurydza (*Zea* L.) pochodzi z Ameryki i jest reprezentowany w świecie przez gatunek kukurydza uprawna (*Zea mays* L.). Roślina ta była znana i rozpowszechniona w uprawie już 5 tys. lat temu za sprawą Majów i Azteków [330]. Prawdopodobnie w XV wieku trafiła do Hiszpanii, skąd rozprzestrzeniała się na Europę, Azję i Afrykę. Obecnie jest ona podstawą wyżywienia w krajach Ameryki Łacińskiej i Afryki [228]. Trwające tysiące lat zabiegi nad doskonaleniem kukurydzy doprowadziły do przystosowania jej uprawy najpierw do warunków panujących na wyżynach andyjskich i centralnego Meksyku, a później w coraz zimniejszych rejonach strefy umiarkowanej, w tym także w Polsce.

**Biologia.** Systematyka botaniczna kukurydzy uprawnej i jej podział na podgatunki opiera się głównie na cechach morfologicznych i anatomicznych ziarna. Biorąc pod uwagę te różnice, wyodrębnia się najczęściej osiem podgatunków (kukurydza koński ząb, kukurydza zwyczajna, kukurydza cukrowa, kukurydza pękająca, kukurydza oplewiona, kukurydza skrobiowa, kukurydza woskowata, kukurydza skrobiowo-cukrowa). Najbardziej rozpowszechniona w uprawie jest kukurydza zwyczajna (*Zea mays* ssp. *indurata*). Należy ona do jarych roślin jednorocznych o diploidalnej liczbie chromosomów [330].

System korzeniowy kukurydzy jest wiązkowy i bardziej rozwinięty niż pozostałych zbóż. Korzenie wiązkowe osiągają długość nawet 2 metrów, co wpływa na dobre wykorzystanie wody i składników pokarmowych z gleby. Wykształcane w późniejszych fazach rozwojowych korzenie przypowierzchniowe, które rosną niemal poziomo do powierzchni gleby, są w stanie wykorzystać wodę z niewielkich opadów, a nawet z rosy [230]. Rośliny posiadają długą, prostą i wypełnioną tkanką miękką lodygę, z której naprzemianlegle wyrastają liście [330]. Wysokość roślin kukurydzy wynosi od 1,5 do 3 m, natomiast w warunkach Polski nie przekracza 2,5 m. Średnica źdźbła u pod-

stawy może wynosić nawet 50 mm [230]. Kukurydza jest rośliną jednopienną, rozdzielнопłciową – na jednej roślinie wykształcają się dwa kwiatostany (męski – wiecha i żeński – kolba). Owocem jest nieoplewiony ziarniak najczęściej barwy żółtej lub białej.

**Wymagania siedliskowe.** Kukurydza uprawna należy do grupy roślin o cyklu fotosyntetycznym typu  $C_4$ . Porównując potrzeby cieplne, wyrażone sumą temperatur w okresie wegetacji, z innymi roślinami uprawnymi, można stwierdzić, że jest rośliną ciepłolubną. Rośliny tego szlaku fotosyntezy wykształciły mechanizmy anatomiczne i fizjologiczne pozwalające na zwiększenie stężenia  $CO_2$  w komórkach i zahamowanie procesu fotooddychania, stąd cechują się wyraźnie wyższą wydajnością fotosyntezy i szybszą produkcją biomasy niż rośliny typu  $C_3$ . Pierwszym ich trwałym produktem wiązania  $CO_2$  są związki chemiczne o czterech atomach węgla. Występują głównie w klimacie gorącym, gdzie czynnikiem limitującym fotosyntezę nie jest energia słoneczna, lecz woda. Ponieważ mechanizm wiązania  $CO_2$  odbywa się przy zamkniętych aparatach szparkowych, umożliwia to kukurydzy szybki wzrost plonu przy niewielkim zapotrzebowaniu na wodę.

Według Machula [214] wschody kukurydzy rozpoczynają się przy temperaturze gleby wynoszącej około  $10^{\circ}C$ . Wcześniejsze siewy w chłodniejszą glebę znacząco opóźniają kiełkowanie i wschody, narażają młode siewki na atak chorób i szkodników glebowych [137]. Według badań australijskich [20] optymalna temperatura do wzrostu roślin wynosi  $18-32^{\circ}C$ . Temperaturę powyżej  $35^{\circ}C$  uważa się za hamującą rozwój. Postęp hodowlany wydatnie zmniejszył wymagania cieplne kukurydzy, jednak są one nadal znacznie większe niż innych zbóż. Jednocześnie powszechnie uważa się, że za sprawą globalnego ocieplenia stała się ona najważniejszą rośliną ziarnową i pastewną świata, wyprzedzając znacząco pszenicę i ryż. Najgorzej znosi duże wahania temperatury, a szczególnym zagrożeniem dla wzrostu i rozwoju roślin są późne przymrozki wiosenne. Odkrycie metody podnoszenia odporności kukurydzy na przymrozki poprzez przeniesienie genu z tytoniu, który uruchamia system naturalnej odporności na stres wysokiej i niskiej temperatury oraz suszy, otwiera szerokie perspektywy przed biotechnologami i hodowcami, a w przyszłości również przed producentami biomasy energetycznej [319].

Kukurydza jest gatunkiem, który w stosunkowo krótkim okresie wegetacji gromadzi duże ilości suchej masy charakteryzującej się wysoką wartością energetyczną. Wysoka produktywność tego gatunku, wytwarzającego w okresie wegetacji bardzo duży i sprawny aparat asymilacyjny, sprawia, że jego potrzeby świetlne, wodne i pokarmowe są wysokie [3]. Wzrost kukurydzy w dużym stopniu zależy od promieniowania słonecznego. Do przechwytywania światła, a więc pełnej asymilacji niezbędnej do wzrostu roślin i dobrego wypełnienia ziarna, wystarcza 5–6 liści (do których światło musi przeniknąć) w pobliżu

i powyżej kolby. [380]. Jako typowa roślina dnia krótkiego na przesuwanie jej uprawy na północ reaguje opóźnieniem rozwoju generatywnego i obniżaniem zawartości suchej masy w biomase. Postęp w hodowli odmian przystosowanych do produkcji w warunkach dnia długiego jest bardzo duży. Michalski [230] wskazuje kukurydzę jako typowego reprezentanta roślin o niskim współczynniku transpiracji (250–350 mm) i podkreśla, że do osiągnięcia wysokich plonów biomasy potrzeby wodne są znacznie wyższe. W uprawie kukurydzy na biomasę z całych roślin najważniejsze jest ciepło i dostateczna ilość wody w okresie intensywnego wzrostu. Okres krytycznego zapotrzebowania na wodę następuje od około trzech tygodni przed kwitnieniem do dwóch tygodni po tym stadium. Vance i in. [349] uważają, że mimo bardzo dobrej gospodarki zasobami wodnymi, plon biomasy przy opadach w okresie wegetacji wynoszących około 300 mm może być o 40–60% niższy w stosunku do optimum wynoszącego 500–1200 mm. Sulewska [318] podaje, że sama suma opadów w wieloletnim okresie nie odzwierciedla w pełni zaopatrzenia kukurydzy w wodę, gdyż o wysokości plonów w dużej mierze decyduje ich rozkład w sezonie wegetacyjnym. Mokry sierpień i wrzesień sprzyjają wysokim plonom biomasy nadziemnej [71]. W warunkach Polski większy wpływ na plonowanie kukurydzy mają sumy opadów niż średnia temperatura powietrza w okresie od maja do września.

Obfity, głęboko sięgający system korzeniowy kukurydzy umożliwia jej uprawę na różnych typach gleb [230]. Najlepiej pod uprawę nadają się gleby głębokie, zasobne w próchnicę, szybko nagrzewające się, o dobrej strukturze oraz przepuszczalne i posiadające odpowiednią pojemność wodną. Powinny charakteryzować się odczynem zbliżonym do obojętnego. Pod jej uprawę nie należy wybierać gleb ciężkich, zlewnych, zimnych i podmokłych oraz zbyt suchych i piaszczystych [197]. Najlepsze są gleby posiadające zdolność do gromadzenia zasobów wody. Uprawa kukurydzy na glebach lekkich i piaszczystych niesie ze sobą ryzyko niepowodzenia [390]. Przy wyborze stanowiska do uprawy kukurydzy oprócz jakości gleby należy uwzględnić również poziom wód gruntowych. Powinien on sięgać do strefy zasięgu systemu korzeniowego. Jakość pokrywy glebowej Polski jako naturalnego siedliska produkcji jest, jak powszechnie wiadomo, mało korzystna. Dlatego gleby najlepsze należy rezerwować pod rośliny najbardziej wymagające, takie jak burak cukrowy, pszenica, rzepak czy groch. Udział kompleksów pszennych (bardzo dobry, dobry, wadliwy) wynosi około 26% gruntów ornych i tu kukurydza występuje rzadko, tylko w niektórych regionach (np. Żuławy Wiślane). Udział gleb kompleksów żytnich (bardzo dobry, dobry, słaby) wynosi około 50%, a zbożowo-pastewnego mocnego około 5%. Są one przydatne pod kukurydzę przynajmniej w 70% (co stanowi około 4 mln ha), jednak wymagają dbałości o właściwy odczyn gleby. U kukurydzy występuje w plonie silna interakcja gleby z poziomem nakładów na agrotechnikę, tzn. w miarę ich intensyfikacji jakość gleby ma mniejsze znaczenie.

Aktualnie w kraju uprawia się kukurydzę na obszarze około 750 tys. hektarów, w tym 425 tys. ha na kiszonkę z całych roślin [121]. Występują więc rezerwy siedlisk rolniczych do zwiększenia areału i produkcji surowca tego gatunku.

**Wymagania agrotechniczne.** Kukurydza jest bardzo tolerancyjna w stosunku do przedplonu. Nie ma więc przedplonów nieodpowiednich do jej uprawy. Roślina ta jest modelowym gatunkiem do uprawy w monokulturze i płodozmianach uproszczonych. W przypadku dłuższej monokultury pojawiają się jednak problemy ekologiczne takiej uprawy, które dotyczą przede wszystkim kompensacji chwastów, chorób i szkodników oraz zubożenia gleby w mikrośladniki [318]. W przypadku gleb dobrych duży udział pszenicy i kukurydzy zwiększa udział fuzariów w środowisku i ziarnie oraz wydatnie zwiększa występowanie mikotoksyn [263]. Ze względu na występowanie specyficznych grzybów patogenicznych oraz kompensację zachwaszczenia uprawa kukurydzy po sobie nie powinna być dłuższa niż 2–4 lata [197, 231]. W polskich warunkach siedliskowo-agrotechnicznych nie ma uzasadnienia dla upraw ciągłych kukurydzy. Plonotwórcza rola przedplonu wzrasta na glebach słabszych. Najlepszymi przedplonami dla kukurydzy są rośliny okopowe uprawiane na oborniku, strączkowe (lubin, groch pastewny, wyka) i ich mieszanki ze zbożami oraz bobowe wieloletnie o mniejszych wymaganiach glebowych. Ze względu na dużą koncentrację zbóż w strukturze zasiewów najczęstszym przedplonem kukurydzy są zboża kłosowe. Pomimo że kukurydza na biogaz jest mniej wrażliwa na wszystkie agrofagi, to nie powinna być jedynym w gospodarstwie surowcem biogazowym.

Uprawa roli pod kukurydzę powinna uwzględniać rodzaj przedplonu. Po zbożach, bobowych oraz mieszankach zbożowo-bobowych należy wykonać klasyczną uprawę późniwą oraz głęboką (25–30 cm) orkę zimową [214]. Taki rodzaj uprawy zakłada dobre spulchnienie, odwrócenie i rozdrobnienie warstwy ornej oraz wyrównanie zawartości składników mineralnych w niej zawartych [277]. Dopuszcza się zastąpienie tradycyjnej podorywki talerzowaniem ścierniska agregatami talerzowymi czy kultywatorowaniem podcinającym ściern. Na polach mocno zachwaszczonych zabiegi takie należy powtórzyć, nie dopuszczając do zazielenienia chwastów. Późniwą uprawą pod kukurydzę uprawianą po kukurydzy zakłada wykonanie dwukrotnego talerzowania w celu rozdrobnienia i płytkiego wymieszania pozostawionych resztek oraz orkę przedzimową.

Wiosenne zabiegi mają na celu zachowanie pozimowych rezerw wody glebowej, wymieszanie nawozów z glebą oraz stworzenie korzystnych warunków do szybkich i wyrównanych wschodów. Uwzględniając te funkcje, nie należy zbyt mocno zagęszczać gleby, a jej spulchnienie nie powinno być zbyt głębokie [197]. W celu przygotowania gleby do wysiewu ziarna kukurydzy



zaleca się na kilka dni przed siewem zastosowanie agregatu uprawowego, składającego się z kultywatora i wału strunowego. Głębokość pracy kultywatora powinna wynosić od 5 do 8 cm [231]. Względy ekonomiczne oraz środowiskowe coraz częściej skłaniają do stosowania uproszczonych systemów uprawy roli [76]. Z badań Sekutowskiego [300] nad zależnością pomiędzy uproszczeniami w uprawie roli pod kukurydzą a dynamiką zachwaszczenia oraz plonowaniem wynika, iż stosowanie uproszczeń w 3-letniej monokulturze kukurydzy w stosunku do uprawy tradycyjnej może spowodować wzrost zachwaszczenia nawet o 37% oraz istotny spadek plonu ziarna o 42%. Stosowanie siewu bezpośredniego (bez uprawy roli) powoduje natomiast powierzchniowe wnoszenie nawozów mineralnych, a przez to płytsze rozmieszczenie systemu korzeniowego i jednostronne zubożenie górnych warstw gleby z niektórych składników. Skutkiem tego jest zmiana właściwości chemicznych gleby, głównie jej zakwaszenie [213], oraz fizycznych, takich jak zwiększenie zwięzłości i gęstości oraz zmniejszenie porowatości ogólnej i pojemności kapilarnej objętościowej [76]. Uproszczenia w uprawie roli powinny zapewniać jednak poprawne wykonanie siewu oraz uzyskanie dobrej obsady roślin, co jest możliwe tylko w warunkach chemicznej regulacji zachwaszczenia. Spadki plonów w uprawach uproszczonych w stosunku do uprawy tradycyjnej nie są czynnikiem skłaniającym do częstego stosowania takich systemów [215].

Uważa się, że fenologicznym wskaźnikiem terminu siewu kukurydzy w Polsce jest okres kwitnienia czereśni, porzeczek czerwonej, czeremchy czy mniszka lekarskiego [137]. Kalendarzowy termin jej siewu, w zależności od regionu Polski, przypada od 10 kwietnia do pierwszych dni maja [231]. Jak zauważają Kruczek i Sulewska [194], zbyt wczesny siew ogranicza pobieranie azotu, zaś optymalny i opóźniony termin siewu wpływa dodatnio na pobranie i gromadzenie w roślinach składników pokarmowych, głównie fosforu i potasu. Według Michalskiego [231] kukurydzą przeznaczoną na kiszonkę można siać o kilka dni później niż uprawianą na ziarno.

Siew kukurydzy powinien odbywać się siewnikami punktowymi w rozstawie 70–80 cm. Wyposażenie siewników punktowych w urządzenia do aplikacji nawozów i środków ochrony roślin zwiększa dostępność składników nawozowych dla roślin, co wpływa na lepszy ich rozwój, zwłaszcza w początkowych fazach [231]. W zależności od właściwości fizycznych gleby głębokość siewu powinna wynosić od 4 cm na glebach ciężkich do 8 cm na glebach lżejszych. Optymalna obsada roślin kukurydzy uprawianej na kiszonkę wynosi 8–14 szt. · m<sup>-1</sup>, co daje odpowiednią efektywną powierzchnię fotosyntetyzującą (LAI 4,0–4,5) [214]. Z badań Szemplińskiego i in. [328], przeprowadzonych w warunkach północno-wschodniej Polski, wynika, że kukurydza wysiewana w terminie opóźnionym (na początku maja) miała korzystniejsze warunki do kiełkowania ziarna, a wschody roślin były pełniejsze (o 10%) w porównaniu z siewem w terminie kwietniowym. Najpełniejsze wschody roślin (96% za-

kładanych) gwarantował wysiew najrzadszy (8 roślin na 1 m<sup>2</sup>). W siewach gęstszych (12 i 16 roślin na 1 m<sup>2</sup>) wschody były gorsze od zakładanych o 9 do 11%. Najwyższy plon, zarówno świeżej, jak i suchej masy, uzyskała kukurydza wysiewana w zagęszczeniu 16 kielkujących ziarniaków na 1 m<sup>2</sup>. Według Michalskiego [231], optymalną obsadę na jednostce powierzchni można otrzymać przez zwężenie międzyrzędzi (do 40–50 cm) i zwiększenie odległości roślin w rzędzie. Taki sposób wysiewu jest możliwy przy założeniu, że zbiór roślin wykonuje się za pomocą przystawki do bezrzędowego zbioru.

Dobór odpowiedniej odmiany do uprawy należy do najbardziej istotnych, nienakładowych czynników plonotwórczych. Podstawowymi kryteriami doboru form mieszańcowych do użytkowania kiszonkowego jest ich wczesność i poziom plonowania, które wpływają na ogólny plon suchej masy oraz zawartość w nim składników organicznych [73]. Wczesność odmian określana jest za pomocą skali FAO poprzez porównanie ocenianej odmiany z przyjętymi wzorcami wczesności. W przypadku odmian użytkowanych na kiszonkę z całych roślin podstawowym parametrem określającym wczesność odmian jest zawartość suchej masy w roślinach [211]. Michalski [231] uważa, że kukurydzę zbieraną na kiszonkę z całych roślin na potrzeby biogazowni można uprawiać na terenie całego kraju. W Polsce obecnie wyróżnia się trzy grupy wczesności (wczesną FAO 230–240, średniowczesną FAO 240–260, średniopóźną FAO 260–290). W 2012 roku krajowy rejestr odmian kukurydzy obejmował 174 mieszańce, w tym 67 o kiszonkowym kierunku użytkowania [211]. Możliwości adaptacyjne odmian w różnych warunkach klimatycznych są bardzo zróżnicowane. Powodzenie uprawy zależy od właściwego doboru mieszańca tak, aby długość okresu wzrostu roślin odpowiadała długości wegetacji oraz jego dostosowaniu do celu uprawy [380]. W rejonach północnej i północno-wschodniej Polski na kiszonkę należy wysiewać odmiany wczesne i średniowczesne, które przy panujących tam warunkach klimatycznych z powodzeniem osiągną pełną dojrzałość ziarna, co pozwoli na wyprodukowanie dobrej jakości kiszonki, a w efekcie wysokiej wydajności metanu. W rejonach środkowej i południowej Polski zaleca się na kiszonkę uprawiać odmiany średniopóźne, charakteryzujące się wyższym plonem biomasy w stosunku do odmian wcześniejszych. W najkorzystniejszych warunkach Polski południowej na potrzeby biogazowni można uprawiać nawet odmiany późne (FAO 300–350), których dotychczas nie zalecano do uprawy w Polsce [231]. Z badań niemieckich [79] wynika, że z odmian późnych, mimo mniejszego udziału kolb i niższej zawartości skrobi, uzyskiwano taką samą wydajność biogazu jak z odmian wczesnych. Autorzy dowiedli również braku istotnego wpływu udziału kolb w kiszonce i zawartości skrobi na metanogenność kiszonki.

Wśród zarejestrowanych form hodowlanych kukurydzy główne typy użytkowe stanowią odmiany mieszańcowe pojedyncze, czyli dwuliniowe (SC), skła-

dające się z dwóch linii ( $A \times B$ ) oraz trójliniowe (TC), składające się z trzech linii  $(AB) \times C$ . Odmiany mieszańcowe podwójne, czyli czteroliniowe (DC), są produktem krzyżowania dwóch linii pojedynczych  $(AB) \times (CD)$ . W rejestrze odmian kukurydzy jest obecnie 99 (57%) form mieszańcowych pojedynczych, 74 (42%) trójliniowych i tylko 1 (1%) odmiana mieszańcowa podwójna. Zaletą form pojedynczych jest większe wyrównanie morfologiczne i niekiedy wyższe plonowanie niż odmian mieszańcowych trójliniowych, głównie w bardziej intensywnych warunkach produkcji, jakkolwiek nie jest to regułą. Formy trójliniowe są lepiej dostosowane do gorszych warunków uprawy. Produkcja nasion odmian mieszańcowych pojedynczych jest mniej wydajna i trudniejsza, dlatego ceny nasion są na ogół wyższe niż trójliniowych [5].

Innowacyjne okazało się wprowadzenie do uprawy kukurydzy odmian typu „stay green”, u których ziarno dojrzewa przy zachowaniu zieloności całej rośliny. Odmiany te w okresie jesiennym, dzięki wciąż aktywnym zielonym częściom wegetatywnym, asymilują dłużej, często aż do dojrzałości pełnej ziarna. Cecha ta powoduje dodatkowy przyrost plonu i lepsze wypełnienie ziarn. W przypadku wystąpienia suszy ryzyko przedwczesnego zasychania roślin jest u tych form mniejsze. Odmiany „stay green” wykazują ponadto większą odporność na zgorzel podstawy łodygi, wywoływaną przez grzyby z rodzaju *Fusarium*. Efekt „stay green” jest szczególnie przydatny na glebach lżejszych, słabo magazynujących wodę, gdzie stan suszy jest zjawiskiem bardzo częstym [186]. Odmiany o przedłużonej zieloności cechują się lepszą jakością. Łodyga i liście zawierają mniej frakcji włókna i cechują się lepszą podatnością na rozkład w procesie metanogenezy w komorze fermentacyjnej [268].

W doskonaleniu cech jakościowych odmian kukurydzy coraz większy udział ma inżynieria genetyczna. Jej efektem jest kukurydza Bt, wykazująca odporność na szkodnika owadziego, jakim jest omacnica prosowianka, której gąsienice żerują w łodygach i kolbach, powodując wcześniejsze zasychanie liści i ich łamliwość [350]. W związku z Rozporządzeniem Rady Ministrów z 2 stycznia 2013 r. w Polsce zabronione zostało wysiewanie kukurydzy genetycznie modyfikowanej MON 810. Z uwagi na zagrożenie zanieczyszczenia pyłkiem miodów produkowanych w Polsce zakaz obowiązuje aż 235 odmian tej kukurydzy [77].

Aby zwiększyć efektywność produkcji biogazu, kiszonka z kukurydzy przeznaczonej do tego celu powinna zawierać co najmniej 30–32% suchej masy o wysokiej wartości energetycznej. W ostatnich latach firmy handlowe dysponują coraz szerszą ofertą odmian kukurydzy przeznaczonych do produkcji biogazu. Firma EURALIS promuje odmianę ES Archimedes i ES Paroli. Pierwsza z nich, oprócz wysokich plonów w użytkowaniu kiszonkowym, charakteryzuje się wysoką odpornością na fuzariozy łodyg i ziarna oraz na wyleganie. Druga posiada mocny efekt „stay green” oraz odznacza się wyjątkową regularnością plonowania. Obie odmiany należą do średniopóźnej grupy wczes-

ności (FAO 250) [379]. Firma LG proponuje na biogaz jedną z najwcześniejszych odmian – LG 30.240, która sprawdza się w trudnych warunkach, dając wysoki plon świeżej i suchej masy [385]. KWS wprowadziła program hodowli odmian energetycznych odrębny od hodowli odmian kiszonkowych na cele pastewne, aby szybciej i wydatniej podwyższyć plon suchej masy z całych roślin. U odmian kiszonkowych przeznaczonych na paszę plon ogólny suchej masy przyrasta wolniej ze względu na konieczność jednoczesnego poprawiania parametrów jakościowych, takich jak zawartość skrobi i koncentracja energii. W wyniku prac hodowlanych wyodrębniono 2 odmiany kukurydzy energetycznej (Atletico K 280 i Cannavaro K 310) [385]. Firma Syngenta jako najbardziej nadające się do produkcji biogazu wskazuje odmiany Delitop, Magitop i Zorrero. Odnaczają się one wysoką jakością surowca, szczególnie wysoką zawartością suchej masy, wysokim plonem oraz dużą strawnością dla bakterii metanogennych [391].

W uprawie kukurydzy kiszonkowej wskazane jest stosowanie nawozów organicznych, które w znacznym stopniu ograniczają zużycie nawozów mineralnych [231]. Według Benedyckiej i in. [21] w 1 tonie obornika o 25% zawartości suchej masy znajduje się 5 kg N, 3 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6,9 kg K<sub>2</sub>O, 5 kg CaO i 1,8 kg MgO. Natomiast 1 tona gnojowicy bydłowej zawiera 3,3 kg N, 1,6 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 3,5 kg K<sub>2</sub>O, 2,1 kg CaO i 0,5 kg MgO, a gnojowica pochodząca od trzody chlewnej – 3,3 kg N, 1,8 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 2,0 kg K<sub>2</sub>O, 1,3 kg CaO i 0,5 kg MgO. W dawce 30 t · ha<sup>-1</sup> obornika wprowadza się do gleby składniki mineralne w ilości 150 kg N, 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 207 kg K<sub>2</sub>O, 150 kg CaO i 54 kg MgO. Z uwagi na niższe wykorzystanie składników pokarmowych zawartych w nawozach organicznych spośród nawozów naturalnych do nawożenia kukurydzy najczęściej stosuje się gnojowicę. W kontekście upraw energetycznych, będących substratem do produkcji biogazu, jako nawóz organiczny można stosować poferment z biogazowni. Charakteryzuje się on lepszą wartością nawozową niż gnojowica zwierzęca, a poprawnie obliczona dawka, w oparciu o zawartość składników pokarmowych, może niemal całkowicie pokryć potrzeby nawozowe kukurydzy. Ma to ogromne znaczenie w końcowym rachunku ekonomicznym [231]. Obornik można stosować jedynie pod orkę zimową, natomiast gnojowicę również wiosną za pomocą specjalnych adapterów (rozlewaczy) w uformowane rzędy kukurydzy.

Kukurydza podczas całego okresu wegetacji wytwarza obfitą ilość biomasy o dużej koncentracji energii. Jej wymagania pokarmowe są wysokie, przewyższają znacznie wymagania innych roślin zbożowych. Rośliny kukurydzy charakteryzuje specyficzna dynamika pobierania składników pokarmowych w okresie wegetacji. Największy niekorzystny wpływ na gromadzenie suchej masy i pobranie azotu, fosforu i potasu ma deficyt azotu w glebie. Pobieranie składników pokarmowych jest zależne od warunków termicznych. Pobranie

azotu jest utrudnione w temperaturze poniżej 5°C, zaś fosforu powyżej 12°C [193]. Dawki nawozów powinny być ustalane w oparciu o wymagania pokarmowe roślin oraz bilans przyswajalnych form składników pokarmowych w glebie [120]. Kukurydza ma średnio duże wymagania pokarmowe. W przeliczeniu na 1 tonę zielonej masy rośliny pobierają około 3,5–4,1 kg N, 1,3–1,5 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6,3–7,7 kg K<sub>2</sub>O oraz 0,7–0,9 kg MgO. Uwzględniając plon biomasy wynoszący 60 t · ha<sup>-1</sup>, zapotrzebowanie łanu kukurydzy na te składniki wynosi: 210–246 kg · ha<sup>-1</sup> N, 78–90 kg · ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 378–462 kg · ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O (75–80% zostaje w słomie) i 42–54 kg · ha<sup>-1</sup> MgO. Wielkość dawek nawozów mineralnych zależy od zasobności gleby w przyswajalne formy tych pierwiastków [197]. Potrzeby nawozowe kukurydzy przy średniej zasobności gleby w fosfor, potas i magnez wynoszą 101–117 kg · ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 140–200 kg · ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O i 60 kg · ha<sup>-1</sup> MgO [21].

Najbardziej plonotwórczym składnikiem pokarmowym jest azot [193]. Jednak stosowanie dużych dawek tego składnika, zwłaszcza na glebach lekkich, może prowadzić do koncentracji azotanów w glebie, skażenia wód gruntowych oraz eutrofizacji zbiorników wodnych. Z kolei obniżenie poziomu nawożenia tym składnikiem uniemożliwia wykorzystanie potencjału produkcyjnego obecnie uprawianych odmian kukurydzy i prowadzi do zmniejszenia plonów. Kluczową rolę w takich warunkach odgrywa zdolność do pobierania azotu, szczególnie na glebach ubogich w ten składnik [260]. Azot jest pobierany przez rośliny w ciągu całego okresu wegetacji [231]. Większość (85%) ogólnego zapotrzebowania na azot zostaje pobrana przez rośliny od fazy 6–8 liścia do fazy zasychania znamion kolby. Intensywne przemieszczanie w roślinie azotu ma miejsce w fazie kwitnienia wiech i wzrasta aż do dojrzewania [193]. Z uwagi na długi okres pobierania azotu zaleca się stosować nawozy wolno działające (np. mocznik i saletrzak), a na stanowiskach niezakwaszonych siarczan amonu [231]. Biorąc pod uwagę fizjologię roślin, całkowitą dawkę azotu najlepiej podzielić na przedsięwną i pogłówną [216]. Na glebach lżejszych najlepiej przedsięwnie zastosować azot w nawozie wieloskładnikowym lub saletrze amonowej. Pogłówną dawkę azotu (50–70%) można stosować w postaci mocznika lub roztworu saletrzano-mocznikowego (RSM). W przypadku RSM-u nawożenie plantacji kukurydzy wykonuje się dwukrotnie w międzyrzędzia. Zastosowanie aplikatorów umożliwia nawożenie kukurydzy bez ryzyka uszkodzeń roślin nawet w późniejszych fazach wzrostu [231]. Deficyt azotu u młodych roślin (o wysokości 20 cm) powoduje redukcję liczby rzędów ziaren w zawiązku kolby, a więc w efekcie obniża plon końcowy. Objawem niedostatecznej ilości tego składnika jest najczęściej blednięcie blaszek liściowych, ich żółknięcie, a nawet zasychanie [193].

Z badań Książaka i in. [196], przeprowadzonych na glebie kompleksu żytznego dobrego, gdzie pH gleby wynosiło 5,05, a zawartość przyswajalnych form w 100 gramach gleby wynosiła odpowiednio 40 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 24 mg K<sub>2</sub>O

i 15 mg MgO, wynika, że zwiększenie poziomu nawożenia azotem z 80 do 120 kg · ha<sup>-1</sup> powodowało niewielkie zwiększenie plonowania oraz ograniczało gromadzenie suchej masy. Nawożenie azotem w dawce 160 kg · ha<sup>-1</sup> N w jednym roku badań przyczyniło się do spadku plonu, zaś w następnym do jego wzrostu o 3 t · ha<sup>-1</sup> suchej masy. Ponadto zwiększenie nawożenia azotem z 80 do 160 kg · ha<sup>-1</sup> N powodowało większą koncentrację białka w roślinach. Fotyma [85] uważa, że w uprawie kukurydzy na kiszonkę optymalna dawka azotu wynosi 140–150 kg · ha<sup>-1</sup> N. Bogucka i in. [25] wykazali, że wysokość dawki azotu jest uzależniona od odmiany – odmiana Junak reagowała wzrostem plonu ziarna do dawki 150 kg · ha<sup>-1</sup> N, natomiast mieszaniec Boruta aż do dawki 180 kg · ha<sup>-1</sup> N. Z badań Księżaka i in. [196] wynika, że zwiększanie dawki azotu nie wywiera znaczącego wpływu na zawartość w roślinach magnezu, wapnia i fosforu, natomiast powoduje wyraźny wzrost koncentracji potasu.

Według Michalskiego [231] odpowiednie zaopatrzenie roślin kukurydzy w fosfor i potas zapewnia dobre zawiązywanie kolb i ich uziarnienie oraz wydłuża okres nalewania ziarna. Ponadto fosfor odpowiada za prawidłowy rozwój systemu korzeniowego i wpływa na zmniejszenie ujemnych skutków braku wody. Jest on pobierany przez rośliny w całym okresie wegetacji, a maksimum przypada na 3–6 tydzień [193]. W warunkach niższej temperatury spada efektywność pobierania składników pokarmowych, zwłaszcza fosforu i azotu [231]. Niedobór fosforu w roślinie znacznie ogranicza fotosyntezę, a więc i ich możliwości produkcyjne [193]. Objawami niedoboru fosforu we wczesnych fazach rozwojowych kukurydzy jest zahamowanie wzrostu młodych roślin oraz purpurowo-czerwone ich przebarwienia [286], a także zahamowanie wzrostu blaszki liściowej i karłowaty wygląd roślin. Zwiększenie potencjalnej dostępności fosforu dla roślin można uzyskać, stosując nawożenie startowe podczas siewu, polegające na aplikacji nawozu (najlepiej wieloskładnikowego) do gleby w pobliżu ziarniaka. W tym celu najlepiej zastosować 120 kg · ha<sup>-1</sup> fosforanu amonu, co odpowiada 55 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 22 kg N [231]. W badaniach Kruczka i Szulca [192] dowiedziono, że rzędowe stosowanie nawozów fosforowych do dawki 130 kg · ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sprzyjało gromadzeniu suchej masy przez rośliny. Bardziej plonotwórcze było działanie fosforanu amonu niż superfosfatu.

Rośliny kukurydzy pobierają duże ilości potasu, którego znacząca część jest gromadzona w łodygach i liściach. Pierwiastek ten odgrywa ważną rolę w procesie fotosyntezy i transporcie asymilatów [193]. W monokulturowej uprawie kukurydzy przeznaczanej na kiszonkę do celów energetycznych wzrost zapotrzebowanie na potas, gdyż znaczna jego część jest wywożona z pola wraz ze słomą. Według Kulczyckiego [200] potas jest wysoce plonotwórczy, wpływa na dynamikę gromadzenia suchej masy, głównie w początkowych

fazach wzrostu. W czasie wegetacji rośliny pobierają najwięcej potasu w fazie 14 rozwiniętego liścia. Badania wykazały, że nawożenie tym składnikiem istotnie zmniejszało pobranie wapnia i magnezu. Zdaniem Michalskiego [231] odpowiednie zaopatrzenie kukurydzy w potas usprawnia gospodarkę wodną roślin, a więc zwiększa tolerancję na suszę. Nawozy potasowe należy stosować łącznie z fosforowymi. Wyjątkiem jest uprawa kukurydzy na glebach lekkich. Wówczas dawkę nawozów potasowych należy podzielić (po 50% przedsięwzięcie i pogłównie) w celu zmniejszenia wymycia tego składnika z gleby.

Efektywność nawożenia NPK w dużym stopniu zależy od odczynu gleby. Im odczyn gleby bliższy jest obojętnego, tym wykorzystanie nawozów mineralnych jest większe. Na glebach kwaśnych utrudniony jest rozwój mikroorganizmów, które odpowiadają za mineralizację słomy oraz obornika. Zaleca się, aby na glebach o odczynie pH poniżej 5,5 stosować wapnowanie. Zabieg ten najlepiej wykonać jesienią po zbiorze przedplonu, przed orką zimową [231].

Ważnym, lecz niestety zaniedbywanym przez producentów problemem w uprawie kukurydzy jest nawożenie magnezem. Składnik ten powoduje szybsze przyrosty biomasy w krytycznych fazach wzrostu. Ogólne zasady nawożenia magnezem sprowadzają się do uzupełnienia rezerw tego składnika w glebie do poziomu co najmniej 5–6 mg Mg w 100 g gleby. W nawożeniu kukurydzy należy zwrócić też uwagę na stosowanie mikroskładników, takich jak cynk, bor i mangan. Głównym sposobem zabezpieczenia potrzeb roślin w stosunku do tych pierwiastków jest nawożenie dolistne [120].

Kukurydza ze względu na specyfikę uprawy (późniejszy termin siewu, szerokie międzyrzędzia, małą obsadę roślin oraz powolny początkowy wzrost roślin) wymaga skutecznej regulacji zachwaszczenia [307]. Według Gołębiowskiej i Knausa [106] stosowanie prawidłowego płodozmienu sprzyja większej bioróżnorodności zbiorowiska chwastów, natomiast w dużym stopniu zmniejsza ich nasilenie i ułatwia niszczenie. Wieloletnia uprawa kukurydzy na jednym stanowisku oraz długotrwałe stosowanie tych samych herbicydów mogą doprowadzić do całkowitego wyeliminowania pewnych gatunków chwastów z danej agrocenozy oraz kompensacji gatunków, których rozwój oraz cechy morfologiczne i fizjologiczne są podobne do cech uprawianej rośliny [288]. Chodzi tu głównie o gatunki prosoвате, które według Michalskiego [231] są najgroźniejszymi taksonami. Potencjalne straty w plonie kukurydzy powodowane przez chwasty są wyższe od tych powodowanych przez szkodniki i choroby [309]. Biorąc pod uwagę częstotliwość występowania chwastów i potencjalną ich szkodliwość, w uprawach kukurydzy najgroźniejsze są chwastnica jednostronna (*Echinochloa crus-galli* L.), komosa biała (*Chenopodium album* L.) i szarłat szorstki (*Amaranthus retroflexus* L.) [273].

Metoda mechanicznej walki z zachwaszczeniem jest trudna i tylko częściowo skuteczna (50–60%) [231]. Również przy odchwaszczaniu chemicznym

należy wziąć pod uwagę różną reakcję odmian na herbicydy, wynikającą z ich wrażliwości na działanie określonych substancji biologicznie czynnych [307]. Dotyczy to tylko niektórych herbicydów (Titus 25 WG – rimsulfuron, Milagro 040 SC – nikosulfuron, Maister 310 WG – foramsulfuron/jodosulfuron metylosodowy/izoksadifen etylowy, Callisto 100 SC – mezotrion, Banvel 480 SC – dikamba), a główną przyczyną wrażliwości roślin jest najczęściej niewłaściwe stosowanie preparatu, niekorzystny układ warunków pogodowych lub mieszanie ich z niezalecanym przez producenta preparatem [197]. Michalski [231] opierając się na kilkuletnich doświadczeniach uważa, że chemiczną regulację zachwaszczenia należy wykonywać dwukrotnie. Pierwszy zabieg najlepiej wykonać po siewie, ale przed wschodami roślin. Jest on najczęściej najbardziej efektywny, gdyż działanie herbicydów aplikowanych w późniejszych terminach, czyli po wschodach kukurydzy, jest często opóźnione, a w niesprzyjających warunkach termicznych może nawet powodować czasowe fitotoksyczne działanie na młode jej siewki. Paradowski i Kierzek [256] uzyskali znaczący przyrost plonu ziarna kukurydzy przy stosowaniu w powschodowych zabiegach herbicydowych adiuwantów zwiększających skuteczność działania substancji aktywnej poprzez lepszą przyczepność cieczy do siewek chwastów oraz obniżenie jej napięcia powierzchniowego. Najkorzystniejszą metodą odchwaszczania kukurydzy jest metoda mechaniczno-chemiczna, czyli integrowana, która jest równie skuteczna co chemiczna, jednocześnie zmniejsza zużycie środków chwastobójczych. Metoda ta może być stosowana zarówno w rolnictwie integrowanym, jak i konwencjonalnym. Polega na zastosowaniu herbicydu Banvel 480 SC (dikamba) w dawce  $1,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  do 3 dni po siewie oraz na jednokrotnym opielaniu międzyrzędzi po wschodach roślin kukurydzy [100].

Szkodniki kukurydzy stanowią zaraz po chwastach poważne zagrożenie dla upraw kukurydzy. Powodując uszkodzenia tkanek roślin, ułatwiają rozwój chorób, które dodatkowo potęgują straty w plonie. Obecnie w kukurydzy żeruje ponad 30 gatunków szkodników, ze zdecydowaną przewagą owadów (głównie omacnica prosowianka oraz rolnice, stonka kukurydziana, ploniarka zbożówka i gnijka, mszyce, drutowce i pędraki, błyszczka jarzynówka), oraz zwierzyna leśna. Masowemu występowaniu szkodników owadzi przeciwdziała przede wszystkim płodozmian, izolacja przestrzenna oraz eliminowanie chwastów, na których mogą występować [23]. W gospodarstwach wielkotowarowych uprawiających kukurydzę walka ze szkodnikami opiera się na metodzie chemicznej i doborze odmian. Taki system uprawy powoduje co kilka lat masowy pojaw danego szkodnika i podnosi koszty ochrony. Rozwiązaniem jest integrowana walka ze szkodnikami, realna tylko w średnich i małych gospodarstwach rolnych. Integrowana produkcja kukurydzy daje możliwość ograniczenia liczności i szkodliwości wybranych gatunków agrofagów metodami agrotechnicznymi, hodowlanymi, biologicznymi, chemicznymi oraz poprzez uprawę odmian



GMO [22]. Metody niechemiczne powinny być stosowane corocznie, gdyż obejmują one głównie odpowiedni płodozmian, pełne przygotowanie gleby do siewu (bez nadmiernych uproszczeń) – polegające na rozdrobnieniu i głębokim przyoraniu resztek poźniwnych, poprawny termin siewu, zbilansowane nawożenie, zwalczanie chwastów oraz terminowy zbiór [23], jak również rozważenie możliwości prawnych do stosowania odmian genetycznie modyfikowanych (kukurydza Bt). Polscy rolnicy nie mają prawa do wyboru odmian GMO, ale pozostałe powyższe elementy technologii produkcji wraz z integrowaną ochroną leżą w zakresie ich możliwości. Według Michalskiego [231] w ostatnich latach w uprawach kukurydzy oprócz szkodników owadzych dużym problemem jest zwierzyna łowna (dziki i jelenie). Alternatywą, niestety mało skuteczną, jest stosowanie środków odstrasżających – repelentów oraz lepsza organizacja opozycyjna rolników wobec bierności służb łowieckich.

Szkodniki występujące na plantacjach kukurydzy mogą stanowić wektory rozwoju chorób grzybowych, bakteryjnych i wirusowych. Czynniki atmosferyczne sprzyjające rozwojowi kukurydzy (duża wilgotność, wysoka temperatura, nasłonecznienie) również sprzyjają rozwojowi patogenów. Kukurydza jest rośliną, na której choroby rozwijają się od wczesnych faz rozwojowych aż po fazę zbioru [344]. Jak podaje Pado i Bereś [254], kukurydzę może zasiedlać nawet 400 patogenów, które są odpowiedzialne za rozwój m.in. główni pyłacej i guzowatej, zgorzeli siewek, zgnilizny korzeni i zgorzeli podstawy łodygi, fuzariozy kolb, plamistości pochw liści kukurydzy, drobnej i żółtej plamistości liści, rdzy kukurydzy oraz choroby szalonych wiech. Podstawowym działaniem prewencyjnym ograniczającym występowanie chorób, a równocześnie proekologicznym jest zaprawianie ziarna. Obecnie w programie ochrony kukurydzy zarejestrowane są tylko trzy zaprawy nasienne (Sarox T 500 FS – karboksyna/tiuram, Vitavax 200 FS – karboksyna/tiuram, Maxim XL 035 FS – fludioksnil/metalaksyl-M). Niechemiczną formą ochrony jest racjonalny wybór odmian mniej podatnych na porażenie głównią guzowatą i fuzariozą kolb i łodyg. Mniejsze ryzyko infekcji występuje na stanowiskach z małą ilością materiału infekcyjnego (w poprawnych zmianowaniach) i dobrym układem stosunków wodno-powietrznych.

Najprostszym sposobem konserwacji substratów do produkcji biogazu jest zakiszanie [199]. Bezpośredni wpływ na jakość kiszonki ma dojrzałość zbieranych roślin. Dobry surowiec kukurydzy do zakiszania powinien się charakteryzować zawartością suchej masy w granicach 30–35%, co zapobiega wypływaniu soków kiszunkowych i stratom składników pokarmowych. Udział dobrze wypełnionych ziarnem kolb w plonie ogólnym świeżej masy powinien przekraczać 40%. Zawartość suchej masy i udział kolb w surowcu są silnie uzależnione od stosowanej technologii produkcji oraz przebiegu pogody [62].

Z badań Kowalika i Michalskiego [186] wynika, że na cechy jakościowe kiszonki kukurydzy odmian typu „stay green” największy wpływ wywiera dojrzałość zbieranych roślin. Zbiór roślin od dojrzałości mleczno-woskowej do wioskowej powodował wzrost zawartości kwasu mlekowego w kiszonce, przy niezmiętej zawartości kwasu octowego i odczynu pH. Natomiast zbiór w dojrzałości pełnej powodował wytworzenie się w kiszonce mniejszej ilości kwasu mlekowego i octowego, co skutkowało obniżeniem się odczynu kiszonki do pH 4,2. Według Michalskiego [231] największy plon zielonej masy kukurydzy można osiągnąć, zbierając rośliny w fazie dojrzałości mlecznej, jednak wartość energetyczna kiszonki jest uzależniona od udziału ziarna. Zatem w kontekście energetycznego jej wykorzystania należy zwracać większą uwagę na plon suchej masy oraz lepszą jego jakość. Jest to możliwe do uzyskania w późniejszych terminach zbioru. Przy wyborze optymalnego terminu zbioru należy zwrócić uwagę nie tylko na dojrzałość ziarna, ale również na stan łodyg i liści. Odmiany posiadające efekt „stay green” zachowują zieloność organów aż do dojrzałości pełnej ziarna. W lata mokre zbiór tego typu odmian należy przesunąć do dojrzałości pełnej, aby zawartość suchej masy wynosiła powyżej 30%. W warunkach niskich opadów oraz po przymrozkach, kiedy źdźbła szybko podсыchają, wymagany jest wcześniejszy zbiór, aby ograniczyć zbyt dużą koncentrację suchej masy.

U odmian nie posiadających wyraźnego efektu „stay green”, zwłaszcza w warunkach o niekorzystnym przebiegu pogody, jakość surowca paszowego do kiszenia może poprawić wysokie ścinanie roślin podczas zbioru. Wyższe koszenie kukurydzy zwiększa udział kolb oraz zawartość suchej masy [227]. W biogazowym kierunku użytkowania roślin koszenie przeprowadza się możliwie nisko nad powierzchnią roli.

O dobrym przebiegu kiszenia oprócz jakości surowca decyduje również dokładność jego rozdrobnienia. Wraz z opóźnianiem zbioru roślin kukurydzy czynnik ten nabiera większego znaczenia i staje się jednym z najważniejszych dla zapewnienia dobrych warunków konserwacji [72]. Za optymalną długość odcinków pociętej biomasy przyjmuje się 12–15 mm – przy zbiorze w dojrzałości mleczno-woskowej, do 8–10 mm – w dojrzałości późnowoskowej i początku pełnej, przy jednoczesnym zapewnieniu pełnego uszkodzenia ziarna [227]. Kaltschmitt i Hartmann [172] wskazują na większe rozdrobnienie roślin – nawet do 4–8 mm, co wpływa korzystnie na proces fermentacji metanowej, a więc na wydajność biogazu. W badaniach Kowalika i Michalskiego [186] dokładne rozdrobnienie powodowało zwiększenie w substracie zawartości suchej masy o  $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  oraz zmniejszało zawartości azotu amonowego. Według Michalskiego [231], z uwagi na duże ilości surowca, zakiszanie biomasy kukurydzianej najlepiej przeprowadzać w silosach przejazdowych wyłożonych i okrytych folią. Kolejne porcje surowca należy dobrze ugnieść w celu większego jego zagęszczenia i usunięcia powietrza.

Zakiszanie zebranej biomasy jest związane z nieuniknionymi stratami surowca [231, 265]. Wynikają one ze strat związanych z procesem oddychania, strat energii powstających w procesie tworzenia kwasów tłuszczowych i alkoholu oraz strat spowodowanych wypływającymi sokami. Te ostatnie są ściśle związane z wilgotnością surowca, a więc z fazą dojrzałości roślin [235]. Tematyka konserwacji surowca i strat z tym związanych jest przedmiotem innego opracowania w niniejszej monografii.

### 2.3.2. Sorgo cukrowe (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench.)

Sorgo cukrowe (*Sorghum saccharatum* (L.) Moench.), nazywane również sorgiem dwukolorowym (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) [180], pochodzi z Afryki i Azji zwrotnikowej i uważane jest za jedną z najdawniej uprawianych roślin, szczególnie przystosowaną do uprawy na obszarach gorących i suchych [343]. Undersander i in. [346] na podstawie cech morfologicznych roślin wydzielili 5 głównych form użytkowych sorga (sorgo ziarniste, sorgo pastewne, trawa sudańska, sorghum–almum oraz hybrydy sorgo z trawą sudańską). Formy te różnią się głównie wysokością, kształtem oraz szybkością drewnienia łodyg u dojrzewających roślin, jak również zawartością i rodzajem węglowodanów rozpuszczalnych w wodzie [12].

**Biologia.** Sorgo cukrowe jest jednoroczną trawą o wyprostowanej, grubej łodydze średnicy 1,2–1,6 cm. Jej wysokość może wynosić nawet 4 metry. Źdźbło jest wypełnione miększym gąbczastym zawierającym cukier. Nowe pędy powstające z węzła krzewienia rozwijają własne korzenie, ale pozostają złączone z rośliną macierzystą. Pomiędzy kolankami na łodydze znajdują się charakterystyczne naprzemianległe rowki, po stronie których z kolanek wyrastają liście. Kształt liści jest zbliżony do kukurydzy – pochwa obejmuje łodygę, natomiast szeroka blaszka liściowa zwisa swobodnie. Kolor blaszki może być zielony, jasnozielony, a nawet białawy – za sprawą znajdujących się wewnątrz pęcherzyków powietrza. W kolankach znajdują się zawiązki wiech, które na szczycie łodyg wytwarzają wiechę z ziarnami [343]. Kwiatostan ma 10–50 cm długości i w zależności od odmiany może mieć skupioną lub luźną postać. Wiecha ma wyraźną oś oraz boczne rozgałęzienia (pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu). Na zakończeniu ostatniego rozgałęzienia znajdują się kłoski (1–4) z jednym kwiatem obupłciowym i bocznymi męskimi kwiatami płonymi. Kwiaty otoczone są twardymi, skórzastymi plewami o barwie od czerwonej do czarnej. Owocem jest wydłużony lub kulisty ziarniak. Masa 1000 ziaren sorga wynosi 14–28 g [134].

Sorgo posiada głęboko sięgający system korzeniowy, który ułatwia pobieranie wody z głębszych warstw gleby, co wpływa na łagodniejsze znoszenie suszy

przez rośliny niż w przypadku kukurydzy. Rośliny sorga przy braku wody przechodzą w swoisty stan uśpienia, wyhamowując swój rozwój i dynamizując vegetację dopiero wtedy, gdy poprawią się warunki wilgotnościowe [164].

Sorgo na świecie uprawia się głównie na ziarno wykorzystywane do celów spożywczych i przemysłowych, do produkcji mąki, kaszy, krochmalu i spirytusu. Z łądyg sorga cukrowego otrzymuje się syrop, z którego produkuje się cukier, a w Chinach sorgo rzemieślnicze używane jest do wyrobu przedmiotów użytkowych (maty, pędzle, szczotki i ozdoby). W warunkach europejskich sorgo nie wykształca nasion i uprawiane jest na biomasę do sporządzania kiszzonek przeznaczanych na paszę lub do celów energetycznych [343]. Coraz częściej wymienia się sorgo jako roślinę alternatywną dla kukurydzy do produkcji biogazu. Jäger [149] podaje, że roślina ta nie jest żywicielem tych samych agrofagów co kukurydza zwyczajna, a technologia jej uprawy jest nieskomplikowana, zbliżona do kukurydzy. Nadaje się także do uprawy mieszanej z kukurydzą w formie mix-cropping.

**Wymagania siedliskowe.** Sorgo ze względu na pochodzenie ma duże wymagania cieplne. Ziarniaki sorga cukrowego zaczynają kiełkować dopiero w temperaturze 8–10°C. Minimum termiczne do normalnego rozwoju roślin to 15°C, a za optymalną uważa się temperaturę wynoszącą 27–30°C [17], co w Polsce jest trudne do spełnienia.

Sorgo jest rośliną o małych wymaganiach glebowych. Może być uprawiane na glebach V i VI klasy bonitacyjnej [212]. Najlepiej nadają się gleby ciepłe i zasobne w składniki pokarmowe. Gleby wilgotne i zimne spowalniają wzrost. Rośliny dobrze tolerują zasolenie gleb lekkich, których optymalny odczyn powinien być zbliżony do obojętnego (pH 6) [346]. Według Hołubowicz-Klizy [134] plony biomasy są wyższe na glebach o dobrym składzie mechanicznym, zawierających więcej próchnicy i zatrzymujących wodę. Chodzi tu głównie o gleby kompleksu 5.

**Wymagania agrotechniczne.** W Unijnym Katalogu Odmian znajdują się 253 odmiany sorgo. Jednak do użytku na cele energetyczne preferuje się odmiany: Sucrosorgo 506 oraz Super sile 20. Ta pierwsza (odmiana wiechowa) odznacza się większym potencjałem plonotwórczym (o 3–5 t · ha<sup>-1</sup>), posiada jednak kruche łądygi, przez co jest bardziej wrażliwa na wyleganie [212]. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych w Europie odmian sorga jest odmiana Super sile o 3 grupach wczesności (15 – wczesna, 18 – średniowczesna, 20 – średnio-późna). Odmianę tę charakteryzuje zdolność do krzewienia, brak podatności na choroby, tolerancja na suszę, małe zapotrzebowanie na wodę (współczynnik transpiracji – 293), wysoka zdolność przyswajania składników pokarmowych, charakterystyczny efekt „stay green” podczas vegetacji oraz duży udział ziarna w plonie biomasy. Plony biomasy tej odmiany sięgają 25 t · ha<sup>-1</sup> s.m. [378]. Natomiast firma nasienna Syngenta Sp. z o.o. promuje odmianę Suc-

rosorgo 506, która doskonale gospodaruje zasobami wody oraz posiada dużą dynamikę wzrostu. Odmiana ta, poprzez efektywniejsze wykorzystanie gleb lekkich, doskonale nadaje się również do uprawy mix-cropping wraz z kukurydzą [389]. Prowadzone na terytorium Niemiec w latach 2008–2009 badania nad wydajnością różnych odmian sorga cukrowego (Goliath, Super sile 20, Sucrosorgo 506, Rona, KWS Zerberus, KWS Maja, Hercules) udowodniły, że największe plony zapewnia odmiana Sucrosorgo 506 ( $19,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s.m.}$ ), najmniejsze zaś odmiany Super sile 20 i Rona ( $14,0$  i  $16,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s.m.}$ ). Potwierdzają to wcześniejsze badania prowadzone w USA, gdzie spośród 19 odmian sorga energetycznego istotnie największe plony biomasy zapewniała odmiana Sucrosorgo 506 [48]. Z badań Mahmood [217] wynika, że najwyższą jednostkową wydajność biogazu zapewniała odmiana Rona 1, jednak największy plon biogazu uzyskano z biomasy odmiany Goliath, głównie ze względu na większą koncentrację suchej masy.

Na glebach żytnych (4 i 5 k.p.r.) najlepszymi przedplonami są okopowe pastewne uprawiane na oborniku i ewentualnie strączkowe jednoroczne – łubin żółty i wąskolistny oraz wyka. Takich przedplonów nie przeznaczają się jednak w Polsce pod sorgo. Pomimo iż przedplony zbożowe i trawiaste zwiększają ryzyko niższego plonowania [229], to jednak nie uniknie się ich w ewentualnej uprawie tego gatunku.

Zasady uprawy roli pod sorgo są analogiczne jak pod kukurydzę [149], jednak kolejność zabiegów przygotowujących glebę do wysiewu nasion jest ściśle uzależniona od przedplonu [180]. Jesienią najczęściej wykonuje się średnio głęboką orkę w celu spulchnienia gleby i zatrzymania jak największej ilości wody pozimowej. Natomiast wiosną przed siewem najlepiej spulchnić glebę za pomocą agregatu uprawowego składającego się z kultywatora z wałem strunowym.

Śliwiński i Brzóska [343] podają, że siew sorga powinien odbywać się w glebę dobrze nagrzaną w celu szybkich wschodów. Optymalna temperatura gleby do siewu nasion wynosi  $10\text{--}12^\circ\text{C}$ . W polskich warunkach klimatycznych optymalny termin siewu sorga przypada pomiędzy 20 maja a 10 czerwca, to jest o 30 dni później niż optymalny termin siewu kukurydzy. Wystarczy to jednak do uzyskania zbliżonego do kukurydzy pokroju roślin już w lipcu. Sorgo przeznaczone na cele energetyczne należy wysiewać w obsadzie od 220 do 260 tys. roślin na hektar [212]. Według Granta i Stocka [117] masa wysiewanego ziarna powinna wynosić od 5,6 do 11,2 kg na hektar (w zależności od masy 1000 ziaren), przy takiej samej rozstawie rzędów jak u kukurydzy (70–80 cm). Szumiło i Rachoń [337] podkreślają duży wpływ rozstawy rzędów na plonowanie roślin. Zmniejszając odległość między rzędami do 25 cm, uzyskali wyższe o 45,5% plony świeżej masy ( $18,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) w porównaniu z rozstawą tradycyjną wynoszącą 75 cm. Według Hołubowicz-Klizey [134] optymalna rozstawa rzędów

w uprawie sorga wynosi 75–100 cm, a Kołodziej [180] uważa, że zbyt rzadki jego siew prowadzi do nadmiernego krzewienia roślin i zwiększania udziału w plonie lodyg. Głębokość umieszczenia ziaren powinna uwzględniać zwięzłość gleb (2–5 cm na glebach zwięzłych, 4–6 na glebach lżejszych). Duże zagęszczenie roślin na jednostce powierzchni obniża zawartość suchej masy, zwiększa udział lodyg, a więc zawartość włókna surowego i włókna neutralnego detergentowego w masie organicznej. Przy zbyt głębokim siewie wschody są wolniejsze i rzadsze [117].

Sorgo może być pewną alternatywą dla kukurydzy w warunkach wysokiego ryzyka jej uprawy, czyli niedoborów wody w okresie wegetacji, w wielu krajach południowej Europy (Rumunia, Bułgaria i Węgry). Dla złagodzenia niskich plonów kukurydzy opracowano technologię współrzędnej, pasowej uprawy wraz z sorgiem. W zależności od ryzyka wystąpienia suszy gatunki siewu się w proporcji 1:1, 2:1, 1:2. Taki sposób uprawy pozwala na równoczesny zbiór po dwa rzędy kukurydzy i sorgo jednocześnie oraz dobre wymieszanie zbieranej zielonki. W efekcie uzyskuje się stabilniejszy plon biomasy. Ze względu na wolniejsze gromadzenie suchej masy przez sorgo do równoczesnego zbioru powinno dobierać się późniejsze mieszańce kukurydzy, przynajmniej o liczbie FAO >250 [343]. We współsiewie sorga z kukurydzą zazwyczaj kukurydzę wysiewa się 2–3 tygodnie wcześniej [180]. W Polsce uprawa mix-cropping występuje rzadziej, głównie z powodu trudności w mechanizacji zbioru.

Wymagania pokarmowe sorga są stosunkowo wysokie. Zapewnienie roślinom pełnego pokrycia na wszystkie składniki pokarmowe jest gwarantem uzyskania wysokiego i wartościowego plonu suchej masy. Wymagania pokarmowe łąno o prognozowanym plonie  $14 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  s.m. wynoszą 182 kg N, 70 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  i 210 kg  $\text{K}_2\text{O}$  [220]. Potrzeby nawozowe na glebach żyznych o średniej zasobności w przyswajalne formy fosforu i potasu wynoszą więc odpowiednio 91 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$  i 170 kg  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . W przypadku gleb o niskiej zasobności w te składniki dawki fosforu powinny być zwiększone do 130 kg  $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ , a dawek potasu nie stosuje się większych niż 180 kg  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Potrzeby te można pokryć w nawozach naturalnych (obornik, gnojowica) lub sztucznych – mineralnych. Aplikacja 20 t obornika wniesie 100 kg N, 60 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 138 kg  $\text{K}_2\text{O}$ , 100 kg CaO i 36 kg MgO. Uwzględniając więc dostępność tych składników rozłożoną na kilka lat, można odpowiednio zmniejszyć dawki nawozów mineralnych.

Według Patela i in. [257] okres krytycznego zapotrzebowania sorgo na fosfor przypada w początkowym okresie wzrostu roślin. Jego niedobór może spowodować ograniczenie rozwoju korzeni, opóźnienie kwitnienia oraz dojrzewania roślin. Zatem sposób i termin nawożenia tym składnikiem należy dobierać w taki sposób, aby był on łatwo dostępny dla rozwijających się roślin. Potas natomiast jest pobierany przez rośliny w dużej ilości i odgrywa ważną

rolę w gospodarce wodnej, wpływając na ich wigor. Podnosi również odporność roślin na choroby. Zdaniem Kołodziej [180], z uwagi na szybki początkowy wzrost roślin niekiedy wskazane jest zastosowanie nawożenia startowego podczas wysiewu nasion. Jednak zazwyczaj nawożenie fosforowo-potasowe stosuje się jesienią pod orkę lub wiosną przed zabiegami doprawiającymi glebę do siewu nasion.

W literaturze krajowej mało jest doniesień dotyczących nawożenia fosforowo-potasowego sorga. Znaleźć natomiast można zalecenia firm zajmujących się obrotem materiału siewnego, które sugerują niskie dawki fosforu i potasu w wysokości 30–60 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$  oraz 60–120 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  [381]. Według badań innych autorów [2] nawożenie sorga fosforem i potasem w dawkach 80 kg  $\cdot ha^{-1}$   $P_2O_5$  oraz 40 kg  $\cdot ha^{-1}$   $K_2O$  powodowało wzrost plonu biomasy o 41% w stosunku do obiektu nienawożonego (18,8 t  $\cdot ha^{-1}$ ). Również łączne stosowanie nawozów fosforowo-potasowych było bardziej plonotwórcze niż samego fosforu lub potasu.

Nawożenie azotem wpływa korzystnie na zawartość białka i węglowodanów oraz odkładanie w tkankach celulozy, hemicelulozy i lignin. Największe zapotrzebowanie na ten składnik rośliny przejawiają w okresie od wykształcenia 6–8 liści aż do fazy zawiązywania wiech. Zaleca się stosować od 80 do 100–250 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . Przy wysokim nawożeniu azotem wskazane jest jego stosowanie w dwóch terminach. Pierwszą dawkę (30–50%) należy stosować przedsięwzięcie, a resztę pogłównie [373]. Z badań Sowińskiego i Liszki-Podkowy [311] wynika, że na madzie rzecznej, bardzo lekkiej, o odczynie kwaśnym do lekko kwaśnego i wysokiej do bardzo wysokiej zasobności w fosfor, niskiej do średniej w potas oraz bardzo niskiej do średniej w magnez, nawożenie azotem nie miało istotnego wpływu na plon świeżej biomasy. Zauważono jedynie niewielką tendencję zwyżkową plonu suchej masy (o 1,3 i 1,8 t  $\cdot ha^{-1}$ ) pod wpływem nawożenia azotem w dawkach 130 i 160 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . W miarę zwiększania dawek azotu (od 80 do 160 kg  $\cdot ha^{-1}$ ) w biomacie sorga zwiększała się zawartość popiołu oraz białka [196]. Obniżenie nawożenia azotem o 40 kg  $\cdot ha^{-1}$   $N$  oraz fosforem i potasem o 20 kg  $\cdot ha^{-1}$  w porównaniu do zalecanej dawki 160 kg  $N \cdot ha^{-1}$ , 80 kg  $P_2O_5$ , 170 kg  $K_2O$  nie powodowało istotnego zmniejszenia plonu biomasy. Jednakże układanie dawek nawozowych pod sorgo należy oprzeć na rachunku ekonomicznym [373]. Buxton i in. [46] po zastosowaniu azotu w dawce 140 kg  $N \cdot ha^{-1}$  uzyskali niewielki wzrost plonu suchej masy sorga (o 0,8 t  $\cdot ha^{-1}$ ) w porównaniu z dawką o połowę mniejszą. Dalszy wzrost dawki azotu przyczyniał się do obniżki plonu. Książak i in. [196] udowodnili, że niezależnie od poziomu nawożenia azotem biomasa sorgo zawiera znacznie wyższą koncentrację magnezu, wapnia i potasu niż kukurydzy. Badania te wykazały, że uprawa sorgo na glebie lekkiej charakteryzowała się większą efektywnością rolniczą i fizjologiczną niż kukurydzy. Wskaźniki te zmniejszyły się w latach o korzystnym rozkładzie opadów.

W początkowych fazach rozwojowych rośliny sorga rosną wolno, a ich konkurencyjność wobec chwastów jest mała [180]. Z badań Skrajnej i in. [305], przeprowadzonych w warunkach środkowej wysoczyzny siedleckiej, wynika, że o zachwaszczeniu upraw sorga decydował przede wszystkim palusznik nitkowaty (*Digitaria ischaemum*), szczaw polny (*Rumex acetosella*), włośnica sina (*Setaria pumilla*), rumian polny (*Anthemis arvensis*), chwastnica jednostronna (*Echinochloa crus-galli*), komosa biała (*Chenopodium album*) i szarłat szorstki (*Amaranthus retroflexus*). Ponieważ sorgo zazwyczaj uprawia się w szerokich rzędach, regulację zachwaszczenia można wykonywać mechanicznie. Książak i in. [196], prowadząc badania w tym zakresie w warunkach ekologicznego systemu uprawy, stwierdzili istniejącą zależność plonowania sorga od stosowania mechanicznych zabiegów odchwaszczających. Zastosowanie opielaacza i obsypnika do zwalczania populacji chwastów było wysoce plonochronne, a przyrost plonu suchej masy w stosunku do obiektów nie odchwaszczanych sięgał nawet 40%. Metoda ta nie była jednak do końca skuteczna – kompleksowa, gdyż zniszczeniu ulegały tylko rośliny chwastów, które znajdowały się w międzyrzędziach, natomiast pozostawały chwasty rosnące w rzędach sorga. Metoda mechaniczna jest jedyną dostępną metodą zwalczania chwastów w zasiewach sorga, gdyż do tej pory nie zostały jeszcze zarejestrowane herbicydy do stosowania w uprawie tej rośliny [308].

Skrzypczak i in. [308] porównywali skuteczność chwastobójczą herbicydów: przedwschodowo – Banvel 480 EC (dikamba) oraz po wschodach roślin – Primextra Gold 720 EC (S-metolachlor, atrazyna), Mustang 306 SE (florasulam, 2,4D), Callisto 100 EC (mezotrion). W efekcie dwuletnich badań stwierdzono, że zarówno w stosunku do masy, jak i liczebności chwastów najwyższą skutecznością odznaczał się preparat Primextra Gold 720 EC. Również Śliwiński i Brzóska [343] stwierdzili dobrą skuteczność w zwalczaniu chwastów jedno- i dwuliściennych S-metolachloru i atrazyny. W badaniach Kaczmarek i in. [165] herbicydy zawierające jako substancję czynną acetochlor, dichloromid, florasulam, 2,4D, fluoksypyr, mezotrion, MCPA oraz dikambę charakteryzowały się bardzo wysoką skutecznością chwastobójczą względem dominujących gatunków chwastów, takich jak: fiołek polny (*Viola arvensis*), komosa biała (*Chenopodium album*), rdest (*Polygonum* ssp.), chwastnica jednostronna (*Echinochloa crus-galli*). Jednak największą selektywność zwalczania chwastów wykazywał preparat Chwastox Turbo 340 SL (MCPA, dikamba). Natomiast zastosowanie mieszaniny florasulfuronu i jodosulfuronu metylosodowego w preparacie MaisTer 310 WG spowodowało całkowite zniszczenie roślin sorga.

Ponieważ sorgo uprawia się w Polsce od niedawna, stąd nie poznano jeszcze wystarczająco towarzyszących tej uprawie szkodników i chorób. Na terenach, gdzie sorgo jest jedną z podstawowych roślin zbożowych, wymienia się prawie



150 szkodników owadzych towarzyszących uprawom tej rośliny [217]. Są to głównie *Atherigona soccata* Rond., *Mythimna separata* Walk., *Chilo partellus* Swin., *Stenodiplosis sorghicola* Coq., *Melanaphis sacchari* Zehnt., *Calocoris angustatus* Leth., *Peregrinus maidis* Ashmead i *Helicoverpa*, *Eublemma* i *Cryptoblabes* [217]. W celu zwalczania populacji zidentyfikowanych szkodników na plantacji sorga należy wybrać zintegrowany system ochrony, który opiera się na zasadach dobrej praktyki, uwzględnia progi szkodliwości oraz wykorzystanie naturalnych wrogów występujących w środowisku. Na świecie najczęstszymi objawami chorobowymi sorga są antraknozy wywoływane przez *Colletotrichum graminicola* oraz choroba wywoływana przez wirus MStV, który atakuje wszystkie organy rośliny, powodując zahamowanie jej wzrostu [145].

Zbiór sorgo można wykonać analogicznie jak kukurydzę na kiszonkę. Rośliny sorgo mają tendencję do wylegania, zwłaszcza w latach z dużą ilością opadów. Wówczas zbiór jest utrudniony, bardziej czasochłonny, a ryzyko strat polowych większe [6]. Ze względu na jakość uzyskanej kisonki ważny jest odpowiedni termin zbioru sorga, który przypada na przełom września i października. Jego opóźnianie sprzyja lignifikacji błon komórkowych, a więc obniża wartość energetyczną kisonki [9]. Według Kołodziej [180] optymalny termin zbioru biomasy sorga powinna wyznaczać zawartość w suchej masie, która nie może być mniejsza niż 25%. W przypadku uprawy sorga wraz z kukurydzą termin zbioru wyznacza dojrzałość woskowa kukurydzy, gdy łączna zawartość suchej masy w biomase wynosi 28–32%. Plony świeżej masy sorgo w badaniach ścisłych wynoszą zwykle 70–100 t · ha<sup>-1</sup> w siewie czystym i 50–80 · ha<sup>-1</sup> w siewie mieszanym [229]. Niestety w produkcji są najczęściej dużo niższe.

Biomasa naturalna sorgo w warunkach krajowych zawiera mniej skrobi, natomiast zdecydowanie więcej cukrów rozpuszczalnych w wodzie oraz węglowodanów strukturalnych (NDF i ADF) wchodzących w skład włókna surowego. Taki surowiec podczas zakiszania powoduje intensywną fermentację mlekową, stąd kisonka zawiera dużo kwasu mlekowego i niskie pH. Kisonka o dużej zawartości kwasu mlekowego jest bardzo podatna na rozkład tlenowy po odkryciu przyzmy kisonkowej, gdyż kwas ten jest głównym substratem pokarmowym dla mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład tlenowy [276, 343]. Odporność na rozkład tlenowy jest cechą istotną, gdy kisonka z sorgo jest jedynym substratem w biogazowni. Intensywność fermentacji mlekowej oraz rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład tlenowy (drożdże, grzyby pleśniowe) można ograniczyć przez stosowanie do zakiszania inokulantów zawierających heterofermentacyjne bakterie mlekowe lub konserwantów chemicznych zawierających kwasy organiczne (np. kwas mrówkowy, propionowy) oraz ich soli lub estrów [276].

### 2.3.3. Miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus* Greef et Deu) i miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack)

W kontekście celowych upraw energetycznych do najbardziej wydajnych traw wieloletnich zalicza się głównie gatunki introdukowane z rodzaju *Miscanthus*. Rodzaj ten obejmuje wieloletnie trawy olbrzymie z rodziny wiechlinowatych, pochodzące z ciepłych obszarów południowo-wschodniej Azji. Do Europy (Dania) trafiły w latach trzydziestych XX wieku jako rośliny ozdobne [315]. Spośród wielu gatunków, charakteryzujących się dużą zmiennością wewnątrzgatunkową, w Europie najbardziej rozpowszechniony w uprawie jest miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack) oraz miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus* = *Miscanthus sinensis* 'Giganteus'), który powstał ze spontanicznego skrzyżowania dwóch naturalnie występujących gatunków – miskanta chińskiego (*Miscanthus sinensis*) i miskanta cukrowego (*Miscanthus sacchariflorus*) [115].

**Biologia.** Miskant olbrzymi w części nadziemnej wytwarza od kilkudziesięciu do ponad stu grubych (6–15 mm), sztywnych oraz wypełnionych miększym gąbczastym źdźbeł o wysokości 200–400 cm. Tkanki tworzące pędy zawierają dużo ligniny i celulozy, co sprzyja wysokiej odporności na uszkodzenia mechaniczne i zapobiega wyleganiu w okresie zimowym. Źdźbła mogą być owłosione lub nagie, z wyraźnie widocznymi międzywęzłami. Wyrastające z węzłów liście są długie (60–100 cm), spłaszczone, o lancetowatym kształcie i ostrym zakończeniu brzegów, co świadczy o dużej zawartości w nich krzemionki. Posiadają ciemnozieloną barwę z białym pasem wzdłuż nerwu głównego. Kwiatostany nie wytwarzają nasion, a w warunkach klimatycznych Polski nawet nie wykształcają się i są schowane w pochwach liściowych [331]. Jest to skutkiem nieprawidłowego rozdziału chromosomów w genomie [225], dzięki czemu gatunek ten jest nieplodny, sterylny i nie tworzy nasion. Można rozmnażać go jedynie wegetatywnie przez podział kłączy lub karpy macierzystej oraz kultury tkankowe (*in vitro*) [183]. Miskant olbrzymi posiada silnie rozbudowane podziemne kłącza i głęboki, bardzo ekspansywny system korzeniowy typu wiązkowego, sięgający nawet do 2,5 metra. Jego system korzeniowy umożliwia efektywne pobieranie składników pokarmowych z gleby oraz powoduje dużą tolerancję roślin na deficyt wody.

Miskant cukrowy osiąga średnio od 1 do 4 metrów wysokości [67], chociaż Frey [87] uważa, że jego pędy nie przekraczają wysokości 2,2 metra. Ze względu na dużą zawartość ligniny i celulozy źdźbła są bardzo sztywne i odporne na uszkodzenia. Łodyga ma średnicę około 10 mm, może być naga lub owłosiona z wyraźnie widocznymi węzłami. Blaszki liściowe są długie, spłaszczone i lancetowate o jednolitym zabarwieniu – zwykle jasno- lub

ciemnozielonym [67]. W badaniach Kowalczyk-Juško i Kościka [185] długość blaszek liściowych miskanta cukrowego wynosiła około 40 cm. Powierzchnia blaszki jest bardzo sztywna i szorstka, co świadczy o wysokiej zawartości krzemionki w tkankach [275]. Kwiatostanem miskanta cukrowego jest wiecha lub wiecha kłosokształtna, która przez znaczną część wegetacji utrzymuje się na roślinie [67]. Kwiatostany są bujne i okazałe, a zwarty łan stanowi doskonałą barierę przeciwwietrzną dla sąsiadujących upraw [179]. Miskant cukrowy, mimo iż jest trawą kępową, w odróżnieniu od miskanta olbrzymiego nie tworzy swoistych karp. Wykształca silnie rozbudowane podziemne kłącza (rizomy) i rozległy wiązkowy system korzeniowy, sięgający nawet 2,5 metra w głąb gleby.

**Wymagania siedliskowe.** Największy wpływ na kształtowanie plonu i zróżnicowanie elementów składowych biomasy miskantów ma przebieg pogody podczas wegetacji. Warunki siedliskowe różnicują m.in. liczbę pędów w jednej karpie, wysokość roślin, liczbę węzłów na pędzie, średnicę pędu, zawartość suchej masy i wody, wartość energetyczną oraz wynos makroskładników z plonem [183]. Miskant jest rośliną ciepłolubną o cyklu fotosyntetycznym typu C<sub>4</sub>. Optymalna temperatura do wzrostu roślin, przy której można uzyskać wysokie przyrosty biomasy, wynosi 28–32°C. W warunkach polskiego klimatu temperatura dobową jest oczywiście niższa. Jako bylina wiosenna wegetację zaczyna w temperaturze powyżej 6°C [47]. Wartość ta jest korzystniejsza niż u kukurydzy i wpływa na wydłużenie potencjalnego sezonu wegetacji. Dłuższy okres wegetacji wydłuża gromadzenie biomasy przez rośliny, ale zwiększa również ryzyko działania przymrozków, zwłaszcza wiosennych, na które, głównie rośliny miskanta olbrzymiego, są bardzo wrażliwe. Wykazują też dużą wrażliwość na działanie niskiej temperatury w okresie zimy, zwłaszcza w pierwszym roku uprawy, szczególnie jeśli duże spadki temperatury mają miejsce bez okrywy śnieżnej. W kolejnych latach rozrastające się karpy podziemne gromadzą materiały zapasowe i zwiększają odporność na mróz, a wiosenne przymrozki mogą jedynie częściowo uszkodzić wychodzące z gleby pędy oraz spowolnić ich wzrost, natomiast nie przyczyniają się do wypadania roślin w łanie [388]. Również Scally i in. [297] podkreślają, że rośliny miskanta olbrzymiego w temperaturze od 5 do 10°C rosną wolno, nie pozwalając na wypuszczanie blaszek liściowych. Ma to duże znaczenie podczas wiosennych przymrozków. Mróz nie jest w stanie uszkodzić rośliny, a jedynie ogranicza jej tempo rozwoju. *Miscanthus x giganteus* posiada największą spośród traw typu C<sub>4</sub> zdolność do aklimatyzacji w warunkach Europy Północnej i już w trzecim roku jego uprawy plony biomasy mogą wynosić 24 t · ha<sup>-1</sup> suchej masy.

Miskant olbrzymi, dzięki głębokiemu systemowi korzeniowemu, zdolny jest do pobierania wody z głębokości nawet 2 metrów. Mimo to na jego produktywność duży wpływ ma roczna suma opadów oraz zdolności retencyjne gleby [388].

Jego niski współczynnik transpiracji (250–340) może sugerować, że potrzeby wodne są w pełni zaspokajane, jednak do uzyskania wysokich plonów potrzebuje rocznie 500–700 mm opadów [291]. Znaczna część wody opadowej nie dociera do gleby, lecz jest zatrzymywana przez liście oraz pędy i wyparowuje [388]. Potencjalne straty biomasy związane z niedoborem wody mogą wynosić  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  dla każdego milimetra niedoboru wody w glebie [47].

Według Kusia i Matyki [204] pod uprawę miskanta olbrzymiego najlepiej nadają się gleby średnio zwarte i łatwo nagrzewające się. Mniej przydatne są gleby ciężkie i zlewne. W warunkach Polski jego plantacje powinny koncentrować się głównie na glebach kompleksu 5, klasy bonitacyjnej IVa i IVb, gdzie poziom wód gruntowych sięga 200–250 cm. Uwzględniając ukształtowanie terenu, należy unikać stanowisk położonych w zagłębieniach, gdzie występują późnowiosenne przymrozki, które mogą uszkadzać młode pędy [204]. Ze względu na obfity system korzeniowy oraz mocno rozbudowane kępy korzeniowo-kłączowe możliwa jest jego uprawa na terenach nierównych, narażonych na erozję gleby oraz wymywanie z niej składników pokarmowych i związków próchnicznych [377]. Według Harleya [128] miskant olbrzymi najlepiej rośnie na glebach organicznych, a najwyższe plony uzyskuje na glebach III i IV klasy bonitacyjnej o odczynie średnio kwaśnym do lekko zasadowego (pH od 5,5 do 7,5). Nie jest zasadne zakładanie plantacji na glebach słabszych i nieużytkach, gdyż takie warunki powodują wolny wzrost i niższe plonowanie roślin, co nie jest ekonomicznie uzasadnione.

Słoma miskanta olbrzymiego stanowi paliwo wysokiej jakości do bezpośredniego spalania w kotłach grzewczych. Biomasa z miskanta może być również substratem w procesach zgazowania, zwęglania (wolna piroliza) oraz produkcji biooleju (szybka piroliza) [225].

Wymagania siedliskowe miskanta cukrowego są analogiczne jak miskanta olbrzymiego [270]. Majtkowski [219] podkreśla jedynie jego większą odporność na niską temperaturę. Natomiast z badań Kowalczyk-Juśko i Kościka [185] wynika, że rośliny miskanta cukrowego lepiej się krzewią.

**Wymagania agrotechniczne.** Zgodnie z przepisami Unii Europejskiej rośliny z rodzaju miskant mało zagrażają środowisku rolniczemu i mogą być uprawiane w systemie MLU (*Multi Land Use*). System ten polega na technologii wielokrotnego użytkowania gleby i jej naturalnych zasobów. Uprawa miskanta olbrzymiego sprzyja efektywnemu wykorzystaniu gleby oraz nie pochłania wysokich nakładów na uprawę roli. Zabiegi uprawowe wykonuje się tylko w roku założenia plantacji, a ich koszt rozłożony jest na cały okres użytkowania rośliny (15–25 lat). Można zatem stwierdzić, że uprawa miskantów ma działanie przeciwerozyjne (z wyjątkiem pierwszego roku), zwiększa urodzajność i bioróżnorodność roślin i zwierząt w glebie. Wieloletnia ich uprawa zapewnia lepsze warunki rozwoju organizmom bytującym w glebie,

ssakom i ptakom oraz chroni środowisko naturalne (rośliny pochłaniają duże ilości ditlenku węgla, a system korzeniowy pełni funkcję naturalnego filtratora wody) [205].

Według Sawickiego i Kościka [296] agrotechnika miskanta cukrowego jest jeszcze słabo dopracowana. Brak jest również na rynku sprawdzonych odmian. W warunkach środkowej Europy rozmnażanie miskanta cukrowego za pomocą nasion jest niemożliwe, gdyż roślina nie wytwarza nasion. Stosuje się zatem (jak u miskanta olbrzymiego) rozmnażanie wegetatywne poprzez wysadzanie fragmentów kłaczy oraz za pomocą kultur *in vitro* [274].

Lewandowski [205] podaje, że w wielkotowarowej produkcji biomasy miskanta olbrzymiego komercyjnie dostępny jest jedynie genotyp *Miscanthus x giganteus*. Nie jest to jednak korzystna sytuacja, gdyż niesie ryzyko rozprzestrzeniania się chorób czy wrażliwość na mróz w niektórych rejonach uprawy. Natomiast Greef i in. [118], podkreślając dużą różnorodność genetyczno-fenotypową (np. grubość i liczbę pędów) form powstałych z każdorazowego krzyżowania gatunków rodzicielskich, uważają, że istnieje wiele odmian miskanta olbrzymiego. Uzyskanie wysokich plonów biomasy w warunkach klimatu umiarkowanego (w odniesieniu do rejonów cieplejszych) jest ograniczone. Z tych względów warto wybierać do uprawy takie formy, które w warunkach niższej temperatury osiągają zadowalające plony biomasy [297].

Warunkiem szerokiego rozpowszechnienia uprawy miskanta olbrzymiego jest uzyskanie przez hodowlę nowych odmian odpornych na niską temperaturę i suszę oraz o podwyższonej zawartości celulozy. Może to wpłynąć na wzrost wydajności i stworzyć rynek biomasy oraz jej szersze wykorzystanie w przemyśle energetycznym [271]. W Europie prowadzone są prace hodowlane w ramach Europejskiego Programu Ulepszania Miskantusa – EMI, polegające m.in. na wielokrotnym krzyżowaniu różnych genotypowo osobników wybranych z populacji *Miscanthus sinensis* i *Miscanthus sacchariflorus* (sprowadzonych z Chin oraz dotychczas uprawianych w Europie Północnej i Południowej). Ich celem jest uzyskanie form mieszańcowych, które będą dobrze zimowały w pierwszym roku po posadzeniu, późno kwitły oraz dobrze wykorzystywały dłuższy okres wegetacji do tworzenia wysokiego plonu biomasy. Dadzą one możliwość wybrania jak najlepszych form do określonych siedlisk. Należy jednak podkreślić, że uzyskanie handlowych odmian jest trudne i wymaga dalszych, wzmożonych prac hodowlanych [205]. Trudność doskonalenia tych cech potwierdził również Aurangzaib [8] prowadzący badania nad 9 odmianami miskanta w warunkach stanu Iowa (USA). Oceniane odmiany istotnie różniły się cechami morfologicznymi (wysokość, grubość źdźbła), ale nie wykazywały statystycznych różnic w przezimowaniu roślin oraz plonie biomasy. Zauważono jedynie wyraźną różnicę w dynamice wzrostu u odmiany Amuri. W badaniach Jeżowskiego i in. [159] nad wybranymi klonami miskanta

zauważono dużą ich zmienność genetyczną pod względem plonu biomasy oraz jego struktury. U wszystkich genotypów na wielkość plonu najbardziej wpływało rozkrzewienie roślin i średnica karpny.

Uprawa miskanta cukrowego jest zbliżona do miskanta olbrzymiego. Jednak z uwagi na znacznie niższy plon biomasy odpowiednio dostosowuje się poszczególne ogniwa agrotechniki [219]. Miskant cukrowy, mimo stosunkowo dużego plonu suchej masy, nie wymaga wysokiego poziomu nawożenia mineralnego [296].

Miskanty nie mają szczególnych wymagań odnośnie przedplonu. Uprawa roli przed założeniem plantacji zależy jednak od przedplonu. Poźniwne zabiegi uprawowe mają na celu przede wszystkim przykrycie resztek pozostawionych przez przedplon oraz zniszczenie chwastów. Wykonuje się w tym celu podorywkę oraz kilkukrotne bronowanie. Ostatnim zabiegiem przed zimą jest orka wykonywana na głębokość 20–25 cm, pozostawiona w ostrej skibie do wiosny celem nagromadzenia jak największej ilości wody.

Plantacje miskanta olbrzymiego zakłada się wyłącznie z rizomów wegetatywnych (charakteryzuje je wyższa odporność na niską temperaturę) lub sadzonek otrzymywanych metodą kultur tkankowych (*in vitro*). Sadzonki kłączowe uzyskuje się z 3-letnich plantacji matecznych. Karpy kłączowe wyoruje się wiosną i dzieli na fragmenty długości około 10 cm, przy założeniu, że powinny posiadać przynajmniej 2–3 węzły, z których wyrosną nowe pędy [47]. Sadzenie kłączy miskanta olbrzymiego powinno odbywać się wczesną wiosną (kwiecień) w warunkach dobrego uwilgotnienia gleby z wilgoci pozimowej. Sprzyja to szybkiemu rozwojowi systemu korzeniowego i lepszym wschodom. Rizomy umieszcza się w glebie na głębokości 5–10 cm, w zagęszczeniu uwzględniającym rodzaj i wilgotność gleby, zwykle do 20 tys. sztuk na hektar. Według innych autorów [159] liczba wysadzanych kłączy powinna być mniejsza. Caslin i in. [47] uważają, że aby uzyskać docelową obsadę 10–15 tys. roślin na hektarze, zaleca się wysadzić 16 tys. kłączy (w rozstawie  $0,8 \times 0,8$  m), co oprócz uzyskania optymalnych plonów sprzyja też dostatecznej konkurencyjności roślin wobec chwastów. Szczukowski i in. [326] zalecają w uprawie miskanta olbrzymiego rozstawę rzędów o szerokości 1 m, natomiast rizomów w rzędzie w granicach 0,7–1,0 m. Ich umieszczanie w rzędzie powinno być naprzemienne w stosunku do sąsiednich rzędów. Według Iżewskiej [146] miskanta cukrowego należy wysadzać w zagęszczeniu od 10 do 30 tys. kłączy na hektar w okresie od połowy kwietnia do połowy maja.

Do zakładania plantacji miskanta olbrzymiego tą metodą można używać półautomatycznej sadzarki do ziemniaków lub celowo przystosowanego sprzętu, który umieszcza kłączy równocześnie w dwóch rzędach w płytkiej bruzdzie, a następnie przykrywa i przygniata glebą. Najmniej preferowana, głównie z powodu nierównomiernego rozmieszczenia wysadzanego materia-

łu, jest metoda wysadzania rizomów za pomocą rozrzutnika do obornika, gdzie kłącza wymieszane z glebą są rozrzucone na powierzchni pola, a następnie przyorywane [63]. Prowadzone są też prace nad sadzarkami specjalistycznymi (np. na bazie siewnika do kukurydzy lub sadzarki do porów), z odpowiednią regulacją, które równo i na wymaganą głębokość umieszczają pojedyncze kłącza [47].

Miskant olbrzymi efektywnie gospodaruje składnikami odżywczymi [225]. Wielkość dawek nawozów mineralnych powinna opierać się na analizie zasobności gleby w składniki pokarmowe. W warunkach gleb kwaśnych (pH poniżej 5,5) zaleca się ich wapnowanie, najlepiej wapnem magnezowym [326].

W nawożeniu mineralnym należy zwrócić uwagę na zależność między terminem zbioru biomasy a zasadnością stosowania nawozów mineralnych. Rośliny miskanta olbrzymiego zbierane w okresie od stycznia do marca są wyschnięte, a w organach podziemnych zawierają duże ilości suchej masy, gdyż soki komórkowe podczas zasychania liści odprowadziły składniki mineralne do kłączy i korzeni. Zatem późny zbiór biomasy powoduje, że składniki pokarmowe nie są wynoszone wraz z plonem słomy tylko pozostają na polu w organach podziemnych [225]. Taki sposób zbioru ułatwia przezimowanie roślin, a wiosną powoduje lepszą dynamikę wybijania młodych pędów. O tym, że kłącza są doskonałym organem spichrzowym, świadczy duży ich przyrost już w 3 roku po założeniu plantacji ( $35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  biomasy kłączy wobec  $0,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  kłączy wysadzanych) oraz wysoka w nich kumulacja składników mineralnych ( $115 \text{ kg N}$ ,  $16 \text{ kg P}_2\text{O}_5$  i  $180 \text{ kg K}_2\text{O}$ ) [47]. W badaniach Koteckiego i in. [183] miskant olbrzymi najwięcej azotu zawierał w kłączach w czerwcu –  $23,5 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ , a najmniej w październiku –  $6,5 \text{ g N} \cdot \text{kg}^{-1}$ , natomiast fosforu odpowiednio  $10,65$  i  $1,37 \text{ g P}_2\text{O}_5 \cdot \text{kg}^{-1}$ , a potasu –  $42,66$  i  $9,40 \text{ g K}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Największą koncentrację w kłączach pierwiastki te wykazywały we wczesnych fazach rozwojowych.

Biomasa miskantów może być alternatywnie wykorzystywana do produkcji kiszonki stanowiącej substrat do biogazowni. Badań z tego zakresu jest jeszcze mało. W przypadku przeznaczenia biomasy do produkcji biogazu jej zbiór przeprowadza się jesienią, kiedy rośliny posiadają duży wigor i koncentrację soków komórkowych, a proces przepływu związków do rizomów nie został zakończony. Zbiór w tym terminie oznacza duży wnos z biomasą składników mineralnych. Tę utratę należy zrekompensować wiosną w postaci nawozów mineralnych [225].

Wielkość dawek nawozów mineralnych stosowanych w uprawie miskanta zależy od uzyskiwanych plonów biomasy oraz roku prowadzenia plantacji. Według Fabera i in. [80] w roku założenia plantacji zasadne jest stosowanie wiosną nawożenia NPK w dawkach  $20 \text{ kg P}_2\text{O}_5$  i  $40 \text{ kg K}_2\text{O}$  na  $1 \text{ ha}$  podczas doprawiania gleby do wysadzania rizomów i  $30 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  po przyjęciu się

sadzonek. Kotecki i in. [183] uważają, że w warunkach wysokiej lub bardzo wysokiej zasobności gleby w fosfor i potas nie ma potrzeby przed założeniem plantacji stosowania tych składników w nawozach mineralnych. W przypadku niższej zasobności wskazane jest zastosowanie wiośną przed wysadzeniem rizomów: 30–90 kg  $P_2O_5$ , 80–120 kg  $K_2O$  i około 100 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . Caslin i in. [47] podkreślają, że szczególnie w okresie 2 lat od założenia plantacji niewskazane jest stosowanie wysokiego nawożenia mineralnego, ponieważ pobranie składników pokarmowych przez młode rośliny jest niskie, a te niewykorzystane stymulują tylko rozwój populacji chwastów, więc podrażają technologię o zakup herbicydów. Z tych względów proponuje się strategię nawożenia rozłożoną na 4 lata uprawy: w pierwszym roku – 100 kg  $N$ , 23 kg  $P_2O_5$  i 120 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ , w drugim – 80 kg  $N$ , 13 kg  $P_2O_5$  i 75 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ , w trzecim – 50 kg  $N$  i 40 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ , a w czwartym – tylko 40 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . W kolejnych latach taktyka nawożenia powinna uwzględniać dodatni bilans poszczególnych składników w glebie.

Z badań Caslina i in. [47] wynika, że do uzyskania 10 t naturalnej biomasy rośliny miskanta olbrzymiego pobierają 60 kg  $N$ , 7 kg  $P_2O_5$ , 50 kg  $K_2O$  oraz 3 kg  $MgO$ . Pobranie azotu i potasu jest znacznie większe niż fosforu. Gatunek ten jest typową rośliną potasolubną, o czym świadczy duże gromadzenie potasu w podziemnych organach roślin [47]. Kotecki i in. [183] wykazali, że zwiększanie dawek potasu ze 100 do 149 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  powodowało wzrost wydajności biomasy. Zwyżka ta wynosiła od 11 do 40% w zależności od terminu zbioru roślin i roku uprawy. Większe przyrosty plonów pod wpływem tego składnika odnotowano w początkowych fazach wzrostu roślin, natomiast wraz ze starzeniem się plantacji wartość ta zmniejszała się. Wykazano też, że zwiększanie dawek potasu (ze 100 do 149 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ ) powodowało w roślinach istotną kumulację azotu oraz fosforu (o 24%).

W badaniach wrocławskich [183] w miarę zwiększania dawek azotu (ze 100 do 200 kg  $N \cdot ha^{-1}$ ) obserwowano większe nagromadzenie suchej masy w roślinach miskanta olbrzymiego jedynie w początkowych fazach jego wzrostu. Jednak na końcowy plon świeżej i suchej masy wysokie nawożenie tym składnikiem nie miało istotnego wpływu. Podobnie Himken i in. [132], stosując dawki azotu do 180 kg  $N \cdot ha^{-1}$ , uznali za wystarczającą do optymalnego zaopatrzenia rizomów miskanta olbrzymiego w ten składnik dawkę 60 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . Lisowski i Parwisiak [209] stwierdzili, że wysokie nawożenie mineralne, zwłaszcza azotem, w połączeniu z małą ilością opadów atmosferycznych w okresie wegetacji może powodować wypadanie roślin, zwłaszcza w roku założenia plantacji. Według Kaacka i Schwarza [162] stosowanie dawek azotu powyżej 75 kg  $N \cdot ha^{-1}$  może skutkować wzmożonym wyleganiem pędów miskanta, przede wszystkim na polach nieosłoniętych od wiatru. Może to utrudniać zbiór biomasy, a tym samym powodować obniżkę plonu.



Do nawożenia plantacji miskanta, oprócz nawozów mineralnych, można też wykorzystywać osady z oczyszczalni ścieków. Lisowski i Parwisiak [209] wykazali plonotwórcze działanie osadów z oczyszczalni ścieków w drugim roku prowadzenia plantacji miskanta, gdzie wzrost plonu biomasy był wyższy o 81% w porównaniu do kontroli. Zastosowanie osadów ściekowych w dawce  $63 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  zwiększało plon biomasy o 13% w stosunku do nawożenia mineralnego stosowanego w dawkach: N – 45,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 35 i  $\text{K}_2\text{O}$  – 45  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Można również zamiast nawożenia mineralnego stosować płynny nawóz organiczny w postaci gnojowicy, w dawce nie przekraczającej  $30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , co odpowiada 170–180  $\text{kg}$  N, 75  $\text{kg}$   $\text{P}_2\text{O}_5$ , 150  $\text{kg}$   $\text{K}_2\text{O}$  i 30  $\text{kg}$  MgO [115].

Poziom nawożenia mineralnego miskanta cukrowego powinien uwzględniać szacowaną wysokość plonu. Według Bassama [16] zachowawcze nawożenie miskanta cukrowego w roku użytkowania biomasy wynosi odpowiednio: 60  $\text{kg}$  N, 50  $\text{kg}$   $\text{P}_2\text{O}_5$  i 100  $\text{kg}$   $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Nawożenie azotowe należy stosować wiosną po ruszeniu wegetacji, natomiast fosforowo-potasowe jesienią lub wiosną. Sawicki i Kościk [296] uważają, że w polskich warunkach z jednego hektara można uzyskać od 5 do 20 t suchej masy miskanta cukrowego. Według Ciubiak i in. [51] w drugim roku uprawy miskanta cukrowego zaobserwowano znaczący w stosunku do roku pierwszego przyrost plonu biomasy sięgający 79,6%. Główny wpływ na tak wysoką zwyczaję plonu miał dobrze rozwinięty system korzeniowy, który umożliwił efektywniejsze wykorzystanie składników pokarmowych oraz lepsze zaopatrzenie roślin w wodę. Równolegle stosowane nawozy wieloskładnikowe: Inmarc-4 ( $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), Suprofos 25 ( $400 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) i SuproFoska 20 ( $500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) wykazywały działanie plonotwórcze w stosunku do obiektu nienawożonego. Według Iżewskiej [146] do nawożenia miskanta cukrowego nadają się również komposty. W roku założenia plantacji plon biomasy miskanta cukrowego nawożonego tym nawozem w dawce  $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  s.m. był porównywalny z obiektami, gdzie stosowano nawożenie mineralne w dawce 100  $\text{kg}$  N  $\cdot \text{ha}^{-1}$  (saletra amonowa) i 121  $\text{kg}$   $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$  (sól potasowa). Jednak w kolejnych latach uprawy nawożenie kompostami okazało się mniej plonotwórcze, a rośliny miskanta wykazywały objawy niedoboru potasu. Na obiektach nawożonych kompostami oraz kompostami i nawozami mineralnymi wykazano również zwiększone pobieranie makroskładników przez rośliny w stosunku do obiektów nienawożonych, które w przypadku azotu wynosiło 51,6%, fosforu – 80,4%, potasu – 95,4%, wapnia – 220,3%, magnezu – 70,2%, sodu i siarki – 124,1%.

Zdolności konkurencyjne roślin miskanta olbrzymiego i cukrowego wobec chwastów mają duże znaczenie szczególnie w pierwszych latach po założeniu plantacji. Duże zachwaszczenie powoduje obniżkę plonu biomasy nawet w stopniu wymagającym likwidacji plantacji. Szczególny problem w uprawie tych gatunków stanowią taksony jednoliścienne, zarówno roczne (*Echinochloa*

*crus-galli* i *Apera spica-venti*), jak i wieloletnie (*Elymus repens*), które ze względu na przynależność do tej samej co miskant rodziny botanicznej, *Poaceae*, są trudne do wyeliminowania [301]. W badaniach Roli i in. [289] uprawie miskanta towarzyszyło około 70 gatunków roślin segetalnych, rudealnych i łąkowych. Ich liczebność, z przewagą gatunków jednorocznych (*Agrostis stolonifera*, *Echinochloa crus-galli*, *Anthemis arvensis*, *Amaranthus retroflexus*, *Conyza canadensis*, *Chenopodium album*, *Galium aparine*, *Matricaria maritima* ssp. *inodora*, *Polygonum persicaria*, *Polygonum amphibium*, *Viola arvensis*), była zróżnicowana i zależała od siedliska oraz sposobów użytkowania gruntów ornych. Badania te dowodzą, że zachwaszczenie nasila się, gdy przedplonem są zboża, głównie kukurydza.

Zbiorowiska chwastów w dużym stopniu konkurują z roślinami miskantów o światło i wodę. Zakładając plantację miskantów, należy zwrócić uwagę na odchwaszczenie stanowiska jeszcze przed wysadzeniem rizomów. Nadają się do tego herbicydy zawierające substancję czynną w formie glifosatu, szczególnie przy zakładaniu plantacji po zlikwidowanych użytkach zielonych lub ugorach. Roundup (lub inny środek zawierający glifosat) najlepiej zastosować po ruszeniu wegetacji na zielone rośliny chwastów, co sprzyja lepszemu przemieszczaniu się środka w organach, a więc zwiększa skuteczność chwastobójczą. Po zabiegu należy się wstrzymać przez 10 dni z wykonywaniem prac uprawowych [47].

Z badań Kochanowskiej i Gamrat [179] wynika, że uprawom miskanta olbrzymiego i miskanta cukrowego towarzyszą te same zbiorowiska chwastów. Największe ich nasilenie obserwuje się zwłaszcza w roku założenia plantacji, kiedy powolny rozwój roślin oraz ich słabe jeszcze krzewienie nie sprzyjały powstawaniu nowych pędów i konkurencyjności roślin wobec chwastów. Dopiero w czwartym roku uprawy zagęszczenie pędów miskanta cukrowego na jednostce powierzchni było wystarczające i rośliny dobrze konkurowały z chwastami. Również Kowalczyk-Juško i Kościk [185] zaobserwowali, że intensywne rozkrzewienie roślin w znacznym stopniu ograniczało występowanie chwastów.

Plantację miskanta w roku jej założenia, ze względu na dużą rozstawę rzędów, można odchwaszczać mechanicznie w międzyrzędziach oraz ręcznie w rzędach roślin [204]. Zabiegi mechaniczne wykonuje się tradycyjnymi narzędziami do uprawy międzyrzędzi (pielniki), a ich krotkość uzależniona jest od stanu plantacji podczas wegetacji. Jest to zwykle od 3 do 5 zabiegów. Mechaniczne odchwaszczanie jest czaso-, energo- i kosztochłonne. Pomimo dużej skuteczności mechanicznej pielęgnacji roślin, na wielkoobszarowych plantacjach stosuje się chemiczną walkę z chwastami.

Według Brytyjskiego Departamentu ds. Ochrony Środowiska nie ma oficjalnie zarejestrowanych herbicydów dedykowanych do stosowania w uprawach

miskanta [63]. W polskim krajobrazie rolniczym uprawy miskantów pojawiły się stosunkowo niedawno, stąd nie ma zarejestrowanych środków w IOR ani wyników badań w tym zakresie. Producenci do jego pielęgnacji dobierają herbicydy samodzielnie [326]. Rola i in. [289] zaobserwowali, że przy odchwaszczaniu miskanta olbrzymiego herbicydem (zarejestrowanym dla kukurydzy) Maister 310 WG (foramsulfuron, jodosulfuron metylosodowy) wystąpiły uszkodzenia w postaci chlorozy i nekrozy liści oraz zahamowanie wzrostu, co w konsekwencji doprowadziło do zniszczenia sadzonek. Sekutowski i in. [301], badając skuteczność odchwaszczającą wybranych herbicydów, stwierdzili, że najlepsze efekty w ochronie przed chwastami (wysoka selektywność i skuteczność) rocznych plantacji miskanta olbrzymiego daje stosowanie herbicydu Apyros 75 WG (sulfosulfuron) przeciwko *Apera spica-venti* oraz Callisto 100 SC (mezotrion) w odniesieniu do *Echinochloa crus-galli*. Natomiast na plantacjach starszych (2-, 3-letnich) przy dużym nasileniu występowania *Elymus repens* najlepsze efekty uzyskano, po zastosowaniu graminicydu Perenal 104 EC (haloksyfop-R) w dawce  $1,25 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Badania Roli i in. [289] wykazały, iż najlepsze przedwiosenne działanie odchwaszczające miskanta olbrzymiego (do 7 dni po posadzeniu) uzyskano stosując herbicydy Merlin Super 537 SC (isoksafłutol, atrazyna) oraz Quazar 550 SC (diflufenikan, izoproturon), które skutecznie eliminowały zarówno gatunki jednoliścienne (*Echinochloa crus-galli*), jak i dwuliścienne (*Anthemis arvensis*, *Chenopodium album*, *Thlaspi arvense*, *Polygonum aviculare*, *Viola arvensis*, *Descurainia sophia*, *Centaurea cyanus*, *Sonchus arvensis*). W fazie 5–7 liści miskanta olbrzymiego najskuteczniejsze okazały się natomiast Huzar 05 WG (jodosulfuron metylosodowy), Atribut 70 WG (propoksykarbazon sodowy, ester metylowy soli sodowej kwasu) + Mustang 306 SE (florasulam, 2,4-D) oraz Maister 310 WG (foramsulfuron, jodosulfuron metylosodowy) + Actirob 842 EC (adiuwant). Jednak z uwagi na uszkodzenia roślin powodowane przez Maister 310 WG nie zaleca się stosowania tego preparatu.

Kotecki i in. [183] najlepsze efekty herbicydowej ochrony uzyskali, stosując Chwastox Extra SL (MCPA) w dawce  $3,0 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$  lub Starane 250 EC (fluroksypyr) w dawce  $0,8 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ , gdyż w wyniku ich stosowania plon suchej masy w porównaniu do kontroli był wyższy odpowiednio o 23 i 18%. Literatura brytyjska [47] odnośnie doboru herbicydów w uprawie miskanta olbrzymiego jest bardziej obszerna (tab. 2.1), a zalecane środki zostały przetestowane w wielkoobszarowych gospodarstwach.

Rola i in. [289] podkreślają, że jednorazowe odchwaszczanie miskanta olbrzymiego jest niewystarczające, a po upływie 10–12 tygodni pojawia się zachwaszczenie wtórne, w zwalczaniu którego wybór herbicydów jest dopiero przedmiotem wielu badań. W drugim roku prowadzenia plantacji, kiedy wysokość roślin nie przekracza 1 m, można stosować herbicyd Ally SX (metsulfuron

Tabela 2.1

Herbicydy do odchwaszczania plantacji miskanta olbrzymiego [47]

Substancja aktywna	Nazwa handlowa herbicydu	Dawki i terminy stosowania
Bromoxynil/ioxynil/Diflufenican	Capture	1,1 l · ha <sup>-1</sup>
Bromoxynil/ioxynil	Oxytril CM	2,0 l · ha <sup>-1</sup>
Bromoxynil/Mecoprop-P/ioxynil	Swipe P	5,0 l · ha <sup>-1</sup>
Diflufenican/isoproturon	Panther or Cougar	2,0 l · ha <sup>-1</sup>
Isoxaben	Flexidor 125	2,0 l · ha <sup>-1</sup> – stosować do 14 dni po posadzeniu i przed pojawieniem się roślin
Fluroxypyr	Starane 2, Floxy, Tomahawk, Tandus, Hurler, Binder	2,0 l · ha <sup>-1</sup>
Glyphosate	Roundup (lub środek analogiczny)	6,0 l · ha <sup>-1</sup> – stosować przed założeniem plantacji
Isoproturon	Tolkan Liquid	5,0 l · ha <sup>-1</sup>
Metsulfuron methyl/Tribenuron-methyl	Ally Max SX	42 g · ha <sup>-1</sup>
Metsulfuron-methyl/fluroxypyr	Ally	20 g · ha <sup>-1</sup>
MCPA	Mortone	5,0 l · ha <sup>-1</sup>
Mecoprop-P	Duplosan New Syst	2,3 l · ha <sup>-1</sup>
Mecoprop-P/Dicamba	Foundation	1,25 l · ha <sup>-1</sup>
Pendimethalin	Stomp lub Alpha Pendimethalin	3,3 l · ha <sup>-1</sup> lub 4,0 l · ha <sup>-1</sup> – stosować do 14 dni po posadzeniu i przed pojawieniem się roślin

Źródło: [47].

methyl, tribenuron-methyl). Bada się również stosowanie mieszanin herbicydów, dodając do Ally SX na przykład Duplosan (mecoprop-P) lub Starane (fluroxypyr). W drugim lub trzecim roku uprawy na plantacjach dobrze rozwiniętych (w zależności od warunków klimatycznych i glebowych), zwłaszcza użytkowanych i zbieranych późną zimą dopiero po zaschnięciu roślin na cele opałowe, nie ma konieczności odchwaszczania. Gruba warstwa ściółki z opadłych liści jest przeszkodą dla wschodzących chwastów, natomiast konkurencyjność roślin miskanta (głównie z powodu małej dostępności światła) jest na tyle wysoka, że późno wschodzące siewki chwastów nie są w stanie rozwijać się i giną. Uprawy długoterminowe niosą ze sobą ryzyko przystosowania się pewnych gatunków chwastów. W Polsce nie ma herbicydów zarejestrowanych do odchwaszczania roślin energetycznych.

Rośliny z rodzaju *Miscanthus* na obszarach, z których pochodzą (Azja), są bardzo podatne na porażenie przez choroby i szkodniki [47]. W warunkach europejskich w obrębie rodzaju *Miscanthus* stwierdzono występowanie szeregu

(około 70) patogenów towarzyszących tym uprawom. Dotychczas nie wykazano, aby choroby przez nie powodowane wpływały ujemnie na plon biomasy. Z uwagi na ocieplanie się klimatu w Europie i występowanie coraz cieplejszych okresów letnich istnieje niebezpieczeństwo, że w przyszłości patogeny przyczynią się do spadku produktywności miskanta. Jednym z najszybciej wykrytych i zarazem najczęściej występującym patogenem na roślinach miskanta olbrzymiego jest wirus żółtej karłowatości jęczmienia [285]. Natomiast do chorób powodowanych przez grzyby zalicza się plamistość liści, chorobę podobną do septoriozy liści zbóż, której sprawcą jest *Stagonospora tainanensis* [251]. Jej objawami są początkowo małe, czerwono-brązowe (zależnie od odmiany i gatunku miskanta) plamki pojawiające się na obu stronach liści. Mają kształt owalny lub wydłużony, stopniowo zlewają się w nieregularne plamy. Na brzegach plam występują chlorozy, a wewnątrz ciemne kropki. Silnie porażone tym patogenem liście zasychają, a młode rośliny mogą ulec całkowitemu zniszczeniu [285]. Gams i in. [91] zaobserwowali występowanie objawów fuzariozy pędów powodowanych przez *Fusarium miscanthi* sp. Nov. Porażenie roślin z rodzaju *Miscanthus* przez tego grzyba powoduje bardzo podobne objawy do fuzaryjnej zgorzeli źdźbeł zbóż. Istnieje również niebezpieczeństwo wystąpienia takich chorób, jak pomarańczowa rdza (*Puccinia kuehnii*), rdza zwyczajna (*Puccinia melanocephala*) czy śnieć (*Ustilago scitaminea*) i głownia (*Ustilago kusanoi*) [135].

Plantacje miskanta olbrzymiego są zasiedlane przez liczną faunę owadów, zarówno pożytecznych, jak i szkodliwych. Fiedler i Jaworska [82] zaobserwowały, że uprawom miskanta olbrzymiego towarzyszą liczne owady pożyteczne, głównie pluskwiaki różnoskrzydłe (*Heteroptera*), muchówki (*Diptera*) czy chrząszcze (*Coleoptera*). Na terenie Europy na roślinach miskanta olbrzymiego stwierdzono żerowanie skrzypionki zbożowej (*Lema melanopa*), skrzypionki błękitki (*Lema cyanella*), lednicy zbożowej (*Aelia acuminata*) i zieleńczyka zielonawego (*Chlorophanus viridis*) [248], a na młodych roślinach szczególnie mszyc: czeremchowo-zbożowej (*Rhopalosiphum padi* L.) i różano-trawowej (*Metopolophium dirhodum* Walk.), jak również przyłżeńców [138]. Jednak nie odnotowano przypadków wpływu szkodliwości owadów na plon biomasy miskanta. Zaleca się, aby stosowanie insektycydów w uprawach miskanta olbrzymiego uwzględniało progi szkodliwości szkodników. Do szkodników występujących w uprawach miskanta można zaliczyć również drobne ssaki, np. króliki i zające, które uszkadzają młode pędy roślin, zwłaszcza w pierwszym roku uprawy. W szczególnych przypadkach można ogrodzić plantację siatką [47] oraz stosować odstraszenie.

Na plon biomasy najbardziej wpływa termin zbioru [183]. Badania Cliftona-Browna i Lewandowskiego [52] wykazały, że plon miskanta olbrzymiego zbieranego jesienią (na biogaz) może być o 14–30% większy od plonu biomasy

zbieranej wiosną na cele opałowe. Wpływa na to głównie większa koncentracja wody w zielonej biomase. Potwierdzają to również badania Koteckiego i in. [183], gdzie miskant olbrzymi w jesiennym terminie zbioru dawał o 9,5% wyższy plon biomasy, która zawierała o 16,8% więcej wody niż ze zbioru zimowego. Ponadto wynos składników pokarmowych i popiołu surowego w plonie biomasy podczas zbioru jesiennego był wyższy o 31–69% w porównaniu ze zbiorem zimowym.

Miskant olbrzymi przeznaczony do produkcji biogazu można zbierać silosokombajnami współpracującymi z ciągnikami rolniczymi lub siewkarniami samojezdnymi [326]. Zebrana biomasa w formie świeżej lub zakiszzonej nadaje się jako substrat do produkcji biogazu. Zbyt późny zbiór miskanta i związana z tym większa koncentracja suchej masy w biomase wpływa na mniejszą wydajność metanu [88]. Do zbioru biomasy miskanta cukrowego stosuje się taką samą technologię, jak u miskanta olbrzymiego. Jednak należy zaznaczyć, że za sprawą bardziej wiotkich łodyg, które często zawijają się na elementy robocze maszyn, zbiór odbywa się mniej efektywnie, a organizacja prac polowych jest utrudniona.

## 2.4. Wymagania siedliskowe i agrotechniczne traw typu C<sub>3</sub> i roślin bobowych oraz ich mieszanek z trawami

### 2.4.1. Lucerna siewna (*Medicago sativa* L.)

Rośliny bobowe, do których zaliczana jest lucerna, wykazują specyficzne właściwości chemiczne i biologiczne oraz ekologiczne. Mają zdolność do wchodzenia w symbiozę z bakteriami z rodzaju *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* i *Sinorhizobium*, dzięki którym pobierają azot atmosferyczny, uniezależniając się od azotu mineralnego. Wykorzystywane są głównie w rolnictwie jako bogata w białko pasza dla zwierząt, ale też w pszczelarstwie, ziółolecznictwie, fitoremediacji, a dla niektórych z nich otwiera się perspektywa wykorzystania w energetyce [189].

**Biologia.** Lucerna (*Medicago* L.) ze względu na ekspansywność swoim zasięgiem obejmuje obecnie niemal wszystkie kontynenty. W Polsce rodzaj ten reprezentowany jest przez wiele gatunków, ale największe znaczenie gospodarcze mają lucerna siewna (*Medicago sativa* L.) i lucerna mieszańcowa (*Medicago media* Pers.), jako naturalny mieszaniec lucerny siewnej (*Medicago sativa* L.) z lucerną sierpowatą (*Medicago falcata* L.). Lucerna mieszańcowa przejęła

przede wszystkim wysoką wytrzymałość na mróz i suszę lucerny sierpowatej oraz wysoką plenność lucerny siewnej. W praktyce odmiany lucerny siewnej lepiej nadają się do intensywnego użytkowania [338].

**Wymagania siedliskowe.** Wymagania klimatyczno-glebowe lucerny są dość wysokie [261]. Wynikają one z warunków geograficznych, z których pochodzi, czyli południowo-zachodniej Azji (dawna Persja). Występuje tam klimat kontynentalny (późna wiosna, upalne krótkie lato), a gleby są suche o odczynie obojętnym [338]. Pod względem wymagań świetlnych lucerna jest heliofitem, czyli rośliną światłolubną dnia długiego [261]. Natomiast krótki dzień i niska temperatura hamuje jej wzrost [60]. Kielkowanie nasion rozpoczyna się przy temperaturze 3–6°C. Temperatura powietrza powyżej 20°C i odpowiednia wilgotność gleby powodują szybkie tempo wzrostu pędów. Lucerna siewna nie ma dużych wymagań wodnych, jednak ze względu na uzyskiwanie dużych plonów biomasy pobiera z gleby duże ilości wody (na wyprodukowanie 1 kg suchej masy zużywa jej od 600 do 900 litrów). Pomimo wysokiego współczynnika transpiracji, dzięki głębokiemu i dobrze rozbudowanemu palowemu systemowi korzeniowemu lepiej znosi niedobór wody niż koniczyna łąkowa i dlatego może być uprawiana w stanowiskach bardziej suchych. Największą wrażliwość na brak wilgoci w glebie wykazuje w fazie siewek. Gatunek ten najwierniej plonuje, gdy średnia roczna suma opadów wynosi 500–700 mm [60, 96]. O ile w okresach niedoboru wody silnie rozbudowany, nawet do 3 m, system korzeniowy lucerny może pobrać ją z głębszych warstw gleby, o tyle wiosenne spadki temperatury (szczególnie poniżej zera) wpływają negatywnie na rozwój roślin, powodując uszkodzenia organów zapasowych, głównie szyjek korzeniowych, i w konsekwencji zamieranie niektórych roślin. Z tych względów nie zaleca się uprawy lucerny w strefie nadmorskiej i w górach [96].

W Polsce można lucernę uprawiać na terenie całego kraju, nawet do wysokości 300 m n.p.m. Najlepiej nadają się gleby zaliczane do kompleksów: pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego, pszennego wadliwego, żytniego bardzo dobrego, żytniego dobrego, zbożowo-pastewnego mocnego i pszennego górskiego. Powinny to być gleby charakteryzujące się odczynem zbliżonym do obojętnego, szybko nagrzewające się, przewiewne i przepuszczalne. Gleby podmokłe i bardzo zwarte ograniczają oddychanie i inne procesy życiowe korzeni roślin, a mała ich przewiewność niekorzystnie wpływa na rozwój bakterii brodawkowych (*Rhizobium meliloti*), wiążących wolny azot atmosferyczny. Najwyższą wydajność biomasy uzyskuje się w rejonach ciepłych, o długim okresie wegetacji, czyli na Dolnym Śląsku, w południowej Wielkopolsce, na Ziemi Lubuskiej, w Małopolsce i na Lubelszczyźnie. Uprawa lucerny na glebach zaliczanych do kompleksu żytniego bardzo dobrego, zbożowo-pastewnego mocnego i zbożowo-pastewnego słabego lub w rejonach chłodnych

o mniejszym usłonecznieniu skutkuje obniżeniem plonowania o 30–40% [156]. Według Demidowicza [65] najlepsze warunki klimatyczne do zbioru z plantacji lucerny trzech pokosów fitomasy występują w rejonie Zgorzelca, w pasie od wschodniej części Niziny Śląskiej poprzez Wyżynę Śląską, Pogórze Karpackie i południowo-zachodnią część Kotliny Sandomierskiej do okolic Rzeszowa oraz nad Sanem w okolicy Leska. Warunki klimatyczne do uprawy lucerny pogarszają się w kierunku północno-wschodnim, a najgorsze są na Pojezierzu Suwalskim.

**Wymagania agrotechniczne.** Stanowisko lucerny w płodozmianie powinno uwzględniać zarówno przedplon, jak i roślinę następczą, wykorzystującą zasoby pokarmowe pozostawione przez nią w glebie. Najlepszymi przedplonami dla lucerny siewnej i mieszankowej są rośliny okopowe uprawiane na oborniku, zboża oraz rzepak [306].

Roślina ta nadmiernie przesusza glebę, co często uniemożliwia uprawę roli pod następcze rośliny ozime [359]. Spełnia ważną rolę w płodozmianie, jednak korzystnie wpływając na żyzność i stan sanitarny gleby [156, 306] oraz plonowanie roślin następczych. Silny i głęboki, palowy system korzeniowy, sięgający do 3 m w głąb gleby, przemieszcza składniki pokarmowe do wierzchnich jej warstw, a zapotrzebowanie na azot jest pokrywane głównie dzięki symbiozie z bakteriami brodawkowymi [370]. Resztki pozbiorowe lucerny charakteryzują się korzystnym stosunkiem C:N (287), działają strukturotwórczo oraz wzbogacają glebę w substancję organiczną, z której w kolejnych latach uwalniane są składniki pokarmowe wykorzystywane przez rośliny następcze. Z badań Harasimowicz-Herman [126] wynika, że sucha masa resztek późniwnych 2-letniej lucerny wynosi średnio  $8,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , co oznacza, że należy ona do roślin o wysokim dodatnim bilansie materii organicznej.

Lucerny nie należy zbyt często uprawiać po sobie ze względu na poważne zagrożenie ze strony chorób i szkodników. Przerwa w jej uprawie powinna wynosić co najmniej tyle lat, ile poprzednio rośla na danym polu [156]. Ćwintal i Wilczek [60] wskazują na przerwę co najmniej 4-letnią. Częsta uprawa lucerny po sobie może doprowadzić do wylucernienia, czyli zmęczenia gleby polegającego na zamieraniu roślin na skutek wystąpienia i nagromadzenia w glebie bakteriofagów niszczących bakterie brodawkowe wiążące wolny azot atmosferyczny. Nie wskazana jest też jej uprawa po innych roślinach bobowych. Lucerny nie należy też uprawiać w stanowiskach odchwaszczanych dużymi dawkami herbicydów, ponieważ jest bardzo wrażliwa na niektóre ich pozostałości w glebie [96]. Okres użytkowania plantacji lucerny intensywnie eksploatowanej kośnie wynosi 2–3 lata i 3–4 lata w uprawie tradycyjnej – mniej intensywniej. Dłuższe użytkowanie plantacji prowadzi do znacznego spadku wydajności, wzrostu zachwaszczenia oraz rozwoju szkodników i chorób [60].



Okres jesienny po zbiorze przedplonu powinien być wykorzystany na odchwaszczenie pola, wapnowanie, nawożenie fosforowo-potasowe i wykonanie orki zimowej. Zabiegi przygotowujące pole pod lucernę należy przeprowadzać zgodnie z zasadami dobrej praktyki rolniczej. Ponieważ najczęściej uprawia się lucernę jako wsiewkę w roślinę ochronną (owies na biomasę kiszonkową lub jęczmień jary na ziarno), stąd przedsięwzięta uprawa roli powinna być zgodna z wymaganiami rośliny ochronnej. Stanowisko pod lucernę należy oczyścić z chwastów (przede wszystkim chwastów trwałych – głównie perzu właściwego), ponieważ bezpośrednio po wschodach konkurują one z nią o wodę i składniki pokarmowe. W uprawie przedsięwziętej chwasty można zwalczać metodą chemiczną lub mechaniczną [60, 96].

Ważnym zabiegiem wykonywanym jesienią jest orka przedzimowa na głębokość 25–30 cm. Na glebach z podszwą płużną lub zlewnych konieczne jest zastosowanie głębosza, aby ułatwić prawidłowy rozwój głębokiego systemu korzeniowego lucerny. Wiosenna uprawa roli ma na celu zatrzymanie w glebie wody, zniszczenie kielkujących chwastów i płytkie spulchnienie górnej warstwy roli, aby wysiać nasiona lucerny na optymalną głębokość 1–2 cm [359]. Płytkie umieszczenie nasion wynika z ich wielkości i jest warunkiem równomiernych wschodów.

Lucerna jest bardzo wrażliwa na niskie pH gleby, dlatego przed założeniem plantacji niezbędne może okazać się wapnowanie pod przedplon lub ewentualnie po jego zbiorze [60]. Na glebach z niską zawartością magnezu do wapnowania przydatne jest wapno magnezowe.

Pietrzak i Greła [261] podają, że lucerna na wyprodukowanie 1 t suchej masy pobiera z gleby około 30 kg potasu, 9 kg fosforu i 3 kg magnezu. Nawożenie azotem jest ograniczone, bo zapewniają go bakterie brodawkowe asymilujące azot z powietrza. Proces symbiozy nabiera znaczenia, gdy temperatura gleby przekracza 10°C, dlatego celowe wczesną wiosną może być stosowanie niewielkich dawek azotu (20–30 kg N · ha<sup>-1</sup>) w formach szybko działających [60, 359]. W uprawie lucerny w roślinę ochronną nawożenie przedsięwzięte przed założeniem plantacji powinno uwzględniać zarówno potrzeby rośliny ochronnej, jak i lucerny, a także zasobność gleby w przyswajalne formy fosforu i potasu [96]. Lucerna dobrze wykorzystuje fosfor, a pierwiastek ten nie ulega wypłukiwaniu z gleby, co pozwala na jego stosowanie w całej dawce jednorazowo pod orkę nie tylko w roku siewu, ale też w pierwszym roku pełnego użytkowania, a nawet na cały okres użytkowania. Wilczek [359] podaje, że dawka roczna fosforu powinna wynosić 60–80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a zdaniem Pietrzaka i Greli [261] – 40–80 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> · ha<sup>-1</sup>. Potas jest składnikiem pobieranym przez rośliny lucerny w dużych ilościach, ale też łatwo wypłukiwanym z gleby, dlatego należy go stosować w każdym roku. Nawożenie potasem korzystnie wpływa na gromadzenie w roślinie substancji zapasowych, przez co

zwiększa jej zimotrwałość. Jednorazowe dawki tego składnika przekraczające 100–120 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  stosuje się w dwóch terminach (wczesną wiosną oraz po zbiorze pierwszego pokosu). Dzielenie dawek potasu wynika z faktu luksusowego jego pobierania przez rośliny [261]. Ćwintal [54], badając wpływ trzech poziomów nawożenia fosforowo-potasowego (60 kg  $P_2O_5$  i 90 kg  $K_2O$ , 90 kg  $P_2O_5$  i 135 kg  $K_2O$  oraz 120 kg  $P_2O_5$  i 180 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ ) na plonowanie lucerny mieszańcowej, wykazał, że poziom nawożenia tymi składnikami nie wpływał istotnie na wysokość jej plonów zielonej i suchej masy.

Lucernę można wysiewać w różnych terminach. Najczęściej stosuje się siew wiosenny – od połowy kwietnia do połowy maja (w roślinę ochronną lub bez rośliny ochronnej) oraz letni – od czerwca do połowy lipca (bez rośliny ochronnej). Ze względu na dość duże wymagania świetlne lucerna lepiej rozwija się i plonuje w uprawie bez rośliny ochronnej [61]. Potwierdzają to badania Klickiej i in. [176], przeprowadzone w warunkach północno-wschodniej Polski. Rośliny ochronne wywierały ujemny wpływ na wzrost i rozwój lucerny uprawianej z rośliną ochronną. Ujemny wpływ rośliny ochronnej, niezależnie od tego, czy zbieranej na biomase (owies), czy na ziarno (jęczmień jary), obserwowano już od fazy pełni krzewienia zbóż. W pierwszym roku uprawy plon owsa jako rośliny ochronnej wynosił 30,0 t fitomasy z 1 ha, a jęczmienia 3,3 t ziarna z 1 ha, natomiast odrost ściernianki był znikomy i nie nadawał się do mechanicznego zbioru. Lucerna mieszańcowa uprawiana bez rośliny ochronnej plonowała istotnie niżej (11,8 t biomasy z 1 ha). W pierwszym roku pełnego użytkowania najwyższe plony uzyskano z lucerny uprawianej bez rośliny ochronnej (11,3 t  $\cdot ha^{-1}$  suchej masy), a istotnie niższe plony osiągnięto z technologii z rośliną ochronną (9,8 t  $\cdot ha^{-1}$  suchej masy w przypadku owsa zbieranego na biomase i 9,9 t  $\cdot ha^{-1}$  suchej masy – jęczmienia zbieranego na ziarno). W drugim roku pełnego użytkowania plony nie były istotnie zróżnicowane sposobem siewu, co wskazuje, że lucerna w trzecim roku uprawy nie reagowała już na rodzaj i sposób użytkowania rośliny ochronnej. Wyniki te wskazują na niecelowość zakładania plantacji lucerny bez rośliny ochronnej. Badania Wilczka i Ćwintala [362] wykazały natomiast, że zarówno w roku siewu, jak i w kolejnych latach pełnego użytkowania uzyskuje się większe plony suchej masy lucerny z siewów bez rośliny ochronnej niż z jej uprawy jako wsiewka w jęczmień na ziarno. Badania Fordońskiego i in. [84] dowodzą, że lucerna w pierwszym roku uprawy najwyższe plony, zarówno świeżej (30,2 t  $\cdot ha^{-1}$ ), jak i suchej masy (6,0 t  $\cdot ha^{-1}$ ), uzyskiwała z obiektów bez rośliny ochronnej. Plony świeżej i suchej masy lucerny uprawianej jako wsiewka w jęczmień zbierany na ziarno były aż o 92% niższe. W drugim roku wegetacji różnice pomiędzy badanymi sposobami siewu były nieistotne, jednak najwyższą wydajnością charakteryzował się lucernik zakładany bez rośliny ochronnej. W trzecim roku uprawy lucerny również nie

wykazano różnic w plonach suchej masy pomiędzy sposobami jej siewu. Badania Wilczka i Ćwintala [361] dowodzą jednak, że lucerna wysiewana wiosną dawała w latach pełnego użytkowania większe o około 20% plony świeżej i suchej masy niż z siewu letniego.

Plantacja lucerny powinna być zakładana przy użyciu odmian z krajowego rejestru lub rejestrów unijnych, wyłącznie kwalifikowanym materiałem siewnym. W rejestrze odmian z 2012 roku znajdowały się tylko dwie krajowe odmiany lucerny mieszańcowej (Kometa i Radius – wpisane do rejestru w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku) i 23 odmiany lucerny siewnej, głównie pochodzenia zagranicznego [210]. Wśród odmian lucerny siewnej była tylko jedna odmiana (Ulstar) wyhodowana w polskich warunkach klimatycznych i wpisana do krajowego rejestru w 2004 roku. Jej cechą charakterystyczną są znacznie wydłużone kwiatostany i związane z tym podwojenie liczby kwiatów na roślinie, co znacznie zwiększa plon nasion oraz plon białka i suchej masy z jednostki powierzchni [393]. Podstawowym celem w hodowli nowych odmian lucerny jest uzyskanie przede wszystkim wysokiego plonu zielonej i suchej masy oraz większego udziału drugiego i trzeciego pokosu w plonie rocznym [32, 36, 61].

Z badań COBORU wynika, że odmiany zagraniczne plonują w naszych warunkach podobnie jak krajowe, ale są bardziej odporne na choroby uwiądu pędów, w tym wertycyliozę (najgroźniejszą chorobę grzybową lucerny), którą można zwalczać jedynie w wyniku hodowli odpornościowej. Polskie odmiany lucerny mieszańcowej są wyrównane pod względem reakcji na częstotliwość koszenia i tempo odrastania, a odmiany zagraniczne różnią się rytmem wzrostu, wydajnościami biomasy i jej rozkładem w sezonie wegetacyjnym [33]. Wprowadzone do uprawy odmiany lucerny wielolistkowej (od 5 do 7 listków w liściu) odznaczają się wyższym udziałem białka ogółem i białka właściwego oraz karotenów, soli mineralnych i witamin w plonie. Podwyższenie wartości tych parametrów uzyskano przez zwiększenie stosunku masy liści w porównaniu do łodyg [359].

Przed siewem nasiona standardowo powinny być zaprawione przeciwko zgorzeli siewek, a na glebach, gdzie od dawna nie uprawiano roślin bobowych, powinny być dodatkowo zaszczepione nitraginą zawierającą szczepy bakterii *Rhizobium meliloti* [96]. Optymalna głębokość siewu nasion wynosi 1–1,5 cm na glebach zwięzłych i 1,5–2 cm na glebach lżejszych [359]. Lucernę należy wysiewać w rzędy o rozstawie 10–20 cm. Gęstość siewu nasion w terminie wiosennym powinna wynosić 500–750 szt · m<sup>-2</sup> (10–15 kg · ha<sup>-1</sup> nasion), a w letnim być zwiększona do 750–1000 szt · m<sup>-2</sup> (15–20 kg · ha<sup>-1</sup> nasion). Tak duża gęstość siewu nasion wynika z ich niskiej polowej zdolności wschodów. W badaniach Ćwintala i Sowy [58] polowa zdolność wschodów lucerny siewnej odmiany Legend wynosiła tylko nieco powyżej 40%. W uprawie z rośliną ochron-

na lucernę wysiewa się rozdzielnie i płytko (drugim przejazdem siewnika), najlepiej prostopadle do rzędów rośliny ochronnej lub w jej międzyrzędzia [60]. Komponent wymagający głębszego siewu, np. zboża, powinien być wysiewany jako pierwszy [359]. Młode siewki lucerny są wrażliwe na chłody, dlatego też siew nasion przeprowadza się w drugiej połowie kwietnia, gdy gleba zdąży się ogrzać. W przypadku wysiewu lucerny z rośliną ochronną, termin siewu obu komponentów winien być nieco późniejszy w stosunku do terminu optymalnego dla zbóż (jęczmienia na ziarno lub owsa na biomase) [96].

Pielęgnacja plantacji lucerny w roku siewu zależy od technologii jej uprawy. Zdaniem Gawęł i Brzóska [96] zasiewy lucerny uprawianej z rośliną ochronną w roku siewu w zasadzie nie wymagają stosowania żadnych zabiegów pielęgnacyjnych. Jedynie w przypadku silnego zachwaszczenia plantacji powinna zostać zastosowana chemiczna ochrona roślin przed chwastami. W siewie bez rośliny ochronnej do regulacji zachwaszczenia można stosować zabiegi chemiczne lub mechaniczne. Mechaniczna regulacja zachwaszczenia polega na podkaszaniu lucerny na wysokość 10–15 cm, co skutecznie ogranicza rozwój chwastów.

Ćwintal [56] podaje, że plantacja lucerny zakładana w terminie wiosennym w siewie bez rośliny ochronnej już w pierwszym roku pozwala uzyskać zwykle dwa pokosy biomasy, pierwszy zbierany w fazie kwitnienia roślin, a drugi nie później niż do końca września. Ich łączny plon wynosi przeciętnie 20–25 t · ha<sup>-1</sup> świeżej masy. Z uprawy lucerny jako wsiewki w roślinę ochronną po jej zbiorze uzyskuje się tylko jeden odrost (tzw. ścierniankę) o wydajności do 15 t · ha<sup>-1</sup> świeżej masy. Z letniego siewu lucerny uzyskuje się tylko jeden odrost o zróżnicowanej wydajności – od 5 do 15 t · ha<sup>-1</sup> biomasy. Pełnię plonowania lucerna osiąga w drugim i trzecim roku uprawy.

W latach pełnego użytkowania lucerny zbiór biomasy roślinnej w okresie wegetacji przeprowadza się wielokrotnie, z różną częstotliwością [94]. Najczęściej zbiera się ją trzykośnie, a w użytkowaniu bardziej intensywnym jest nawet 4 lub 5 pokosów. Liczba pokosów wpływa na poziom plonowania, jakość otrzymanej masy roślinnej i trwałość lucernika. Częste koszenie prowadzi jednak do zmniejszenia plonu w następnym roku i skrócenia okresu użytkowania lucernika. Przy użytkowaniu trzykośnym najwyższe plony uzyskuje się, gdy pierwszy wiosenny odrost zbiera się po osiągnięciu przez lucernę wysokości 40 cm, a następne pokosy po upływie kolejnych 45 dni. Koszenie lucerny w odstępach co 35 dni pozwala na zbiór średniej wielkości plonu w 4 pokosach. Koszenie pierwszego odrostu wiosennego w połowie maja, a następnych co 25 dni umożliwia zbiór nawet 5 pokosów [37]. Tak częste koszenie skraca jednak czas użytkowania plantacji do 2 lat i odznacza się istotnie niższym plonowaniem. We wschodnich i północnych regionach kraju zbiór 5 pokosów jest mało realny. Najczęściej spotykane jest koszenie lucerny

3 razy w roku: pierwszy pokos w fazie pąkowania, drugi – w pełni kwitnienia, a trzeci – podczas pąkowania. Takie użytkowanie pozwala uzyskać duży plon zielonej i suchej masy i wydłużyć okres użytkowania lucernika do 3–4 lat. Dobrze jest jednorazowo w sezonie wegetacyjnym doprowadzić rośliny do zakwitnięcia, wtedy lucerna zdąży odnowić rezerwy składników pokarmowych w szybkach korzeniowych [60].

Klicka i in. [176] w warunkach północno-wschodniej Polski uzyskali najwyższą wydajność z lucerny koszonej w fazie kwitnienia co 50 dni – łącznie  $12,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  suchej masy. Zbiór co 40 dni powodował spadek wydajności do  $10,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a najniższe plony suchej masy dawała lucerna koszona co 30 dni –  $7,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Borowiecki i in. [33] najwyższe plony suchej masy uzyskali z lucerny koszonej w odstępach 45-dniowych, co pozwalało na zbieranie 3–4 pokosów w roku. Różnica pomiędzy zbiorem co 45 dni a 25 dni dla trzech miejscowości prowadzenia badań (Wielichowo, Żeliszawki, Borusowa) wyniosła  $4,6 \text{ t}$  suchej masy z 1 ha na niekorzyść większej częstotliwości zbioru. Ćwintal [54] również wykazał, że mniejsza częstotliwość zbioru lucerny powoduje zwiększenie wydajności. Podkreśla on jednak, że różnica na korzyść trzykrotnego zbioru w porównaniu do czterokrotnego wynikała z istotnego spadku plonowania lucerny użytkowanej intensywniej w trzecim roku użytkowania.

Maj i in. [218] podają, że w krajowych warunkach glebowo-klimatycznych średni plon świeżej masy lucerny może wynosić około  $50 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , przy średniej zawartości suchej masy na poziomie 20%. Radkowski i Grygierzec [278] otrzymali z trzech odmian lucerny siewnej (Marshal, Planet, Symphone) plon suchej masy wynoszący  $16,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w pierwszym roku użytkowania i  $18,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  w drugim roku użytkowania. Biorąc pod uwagę dotychczasowe wyniki badań i uzyskiwane w nich plony lucerny, można stwierdzić, iż jej potencjał produkcyjny nie jest w pełni wykorzystany, o czym świadczą średnie plony wynoszące  $29,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  świeżej masy uzyskiwane w szerokiej praktyce rolniczej [121].

Cechy jakościowe biomasy zależą od fazy zbioru lucerny. W badaniach Brzóska [37] zbiór pierwszego pokosu przed pąkowaniem dawał najmniejszy plon suchej masy, który wynosił  $4,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , ale zawartość białka surowego w suchej masie była wtedy największa (22,6%), a włókna najmniejsza (22,3%). Zbiór tego pokosu na początku pąkowania powodował wprawdzie wzrost plonu suchej masy do  $5,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , ale spadek zawartości białka surowego (do 19,9%) i wzrost włókna surowego (do 24,7%). Zbiór lucerny w pełni pąkowania powodował dalszy wzrost plonu suchej masy (do  $6,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), ale jednocześnie spadek zawartości białka w suchej masie (do 18,5%) i wzrost zawartości włókna (do 25,9%). Preferowanie zawartości białka w biomase lucerny przeznaczonej na biogaz nie ma uzasadnienia, dlatego jej koszenie przed początkiem kwitnienia jest nieracjonalne.

Plon biomasy z jednostki powierzchni uzależniony jest od wysokości koszenia. Należy też pamiętać, że wysokość koszenia decyduje o stanie szyjki korzeniowej, a ta o przezimowaniu, trwałości plantacji i jej plonowaniu. Z tego względu wysokość koszenia nie powinna być mniejsza niż 5 cm od powierzchni gleby [60]. W badaniach Klickiej i in. [176] wykazano, że w pierwszym roku pełnego użytkowania koszenie lucerny na wysokości 3 cm istotnie zwiększało plon suchej masy (o 1 t z ha) w stosunku do koszenia na wysokości 10 cm. W drugim roku pełnego użytkowania różnica ta zmniejszyła się do 0,5 t z ha.

Kiszonki z lucerny energetycznej można sporządzać różnymi metodami, zależnie od posiadanego sprzętu rolniczego. Można je wykonywać, zbierając rośliny bezpośrednio po skoszeniu bez podsuszania lub po podsuszeniu. Fito-masę można zakiszać w przyzmach naziemnych, silosach otwartych i półotwartych lub w belach cylindrycznych owijanych szczelnie folią [96]. Najtaniej produkuje się kiszonki z pociętego surowca w przyzmach i silosach płaskich.

#### 2.4.2. Rutwica wschodnia (*Galega orientalis* Lam.)

Rodzaj rutwica (*Galega* L.) obejmuje w Polsce dwa gatunki – rutwicę wschodnią (*Galega orientalis* Lam.) i rutwicę lekarską (*Galega officinalis* L.). Rutwica lekarska zaliczana jest w Polsce do flory rodzimej. Rutwica wschodnia jest wieloletnią rośliną bobową pochodzącą z Kaukazu [170]. Od 100 lat jest przedmiotem zainteresowania rolników, zwłaszcza w rejonach o niekorzystnych warunkach siedliskowych dla roślin uprawnych. Podobnie jak większość roślin introdukowanych z obszarów o ostrych warunkach bytowania, rutwica wschodnia łatwo przystosowuje się do europejskich warunków glebowych i pogodowych, wykazując dużą trwałość zakładanych plantacji i wysoką produktywność [280, 281].

Rutwica wschodnia jest jednym z bardziej predystynowanych gatunków do wykorzystania w agroenergetyce. Kalembasa i Symanowicz [169] twierdzą, że ze względu na duży plon suchej masy i jej wartość opałową ( $17,8 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  powietrznie suchej masy) biomasę z rutwicy wschodniej można wykorzystywać jako surowiec energetyczny. Z 1 ha uprawy tego gatunku można uzyskać nawet 270 GJ energii [189]. Rutwicę ze względu na trwałość można też wykorzystywać do konserwacji wieloletnich ugorów, gdyż jej zasiewy chronią glebę przed erozją i poprawiają jej żyzność [143], a także ograniczają sukcesję chwastów [144].

**Biologia.** Roślina ta posiada cechy szczególnie pożądane w rolnictwie proekologicznym. Cechuje się dużą plastycznością w trudnych warunkach uprawy, dużą produktywnością masy wegetatywnej i bardzo dużą efektywnością redukcji azotu atmosferycznego [143]. W badaniach Symanowicz i in. [321]

średnie pobranie azotu z powietrza przez rośliny rutwicy wschodniej podczas okresu wegetacyjnego wynosiło  $312 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Tak duża redukcja azotu atmosferycznego wynika ze współżycia z bakteriami brodawkowymi *Rhizobium galegae* i mocno rozbudowanego palowego systemu korzeniowego wraz z licznymi korzeniami bocznymi. Korzeń główny wnika jednak płytko w głąb gleby (do 60–100 cm), a korzenie boczne jeszcze płycej. Główna masa korzeniowa znajduje się w warstwie do 30 cm. Z szyjki korzeniowej wyrasta od kilku do kilkunastu ukorzeniających się rozłogów. Rozłogi początkowo rosną poziomo do powierzchni gleby, później wyrastają pionowo, tworząc nowe pędy nadziemne. Stanowią one główny organ spichrzowy rośliny. Dzięki rozłogom może ona rozmnażać się wegetatywnie i rozprzestrzeniać w łanie, zajmując wolne przestrzenie w międzyrzędziach. Pierwszy wiosenny odrost biomasy następuje z pączków znajdujących się na szyjce korzeniowej oraz z rozłogów, natomiast kolejne odrosty również z pąków kątowych liści znajdujących się po skoszeniu na ścierni. Łodygi rutwicy są wzniesione, tworzą od 8 do 14 międzywęźli. W pierwszym pokosie mogą osiągać wysokość do 130 cm, a następne odrosty są już niższe. Rozgałęzienia boczne tworzą się na różnej wysokości pędu, głównie w górnej części. Liście są złożone, nieparzystopierzaste. Ulistnienie pędów jest duże, a ich masa przekracza 50% plonu ogólnego. Roślina wytwarza kwiatostan groniasty. Kwitnie dopiero od drugiego roku wegetacji, głównie w pierwszym pokosie (przełom maja i czerwca) [338].

**Wymagania siedliskowe.** Rutwica wschodnia powszechnie jest użytkowana w surowych warunkach Europy Wschodniej (Estonia, Litwa, Finlandia, Łotwa, Rosja), a także we Francji [141]. Charakteryzuje się dużą zimotrwałością i odpornością na suszę [24]. Proces introdukcji tej rośliny na teren Polski znajduje się ciągle na etapie doświadczeń prowadzonych w nielicznych ośrodkach naukowych. Próby jej rozpowszechnienia w gospodarstwach indywidualnych jak do tej pory nie przyniosły pozytywnych efektów [66]. Zołotiariew i in. [374] wskazują, że w ostatnim czasie obserwuje się coraz więcej plantacji obsiewanych tym gatunkiem.

Rutwica wschodnia znacznie przewyższa długością użytkowania koniczynę, nostrzyk czy lucernę [374]. W Polsce jej plantacje można użytkować do pięciu lat, a nawet i dłużej [144]. Jest to efekt jej dużej odporności na mrozy i chłody w okresie zimy. Bez okrywy śnieżnej wytrzymuje spadki temperatury do  $-25^{\circ}\text{C}$ , a przykryta pokrywą śnieżną nawet do  $-40^{\circ}\text{C}$ . Po wysiewie nasiona kiełkują już w temperaturze  $5\text{--}6^{\circ}\text{C}$ , a optimum termiczne wynosi  $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$  [133]. Wiosenne przymrozki do  $-6^{\circ}\text{C}$  nie uszkadzają liści, natomiast jesienią rośliny wytrzymują spadki temperatury do  $-5^{\circ}\text{C}$  [368]. Niska temperatura wiosenna może jedynie obniżyć tempo wzrostu roślin i wiązania azotu atmosferycznego [133].

Wysokie wymagania świetlne rutwicy wschodniej, w połączeniu z jej początkowym powolnym wzrostem i zagrożeniem silnego zachwaszczania plantacji,

powodują, że o powodzeniu uprawy decyduje przede wszystkim rok założenia plantacji [66]. Szczególnie wrażliwe na niedobór światła są młode rośliny w okresie 40–50 dni po wschodach [382]. Pomimo dużej wrażliwości na zacienianie, zalecana jest jej uprawa jako wsiewki w roślinę ochronną, ponieważ stanowi ona ochronę przed chwastami.

Wymagania wodne rutwicy są dość wysokie, plasują ją pomiędzy koniczyną łąkową a lucerną siewną. Wynika to głównie z jej obfitego ulistnienia, a przez to dużej transpiracji, oraz stosunkowo płytko sięgającego systemu korzeniowego. Dużo wody potrzebuje w pierwszym roku wegetacji, szczególnie w okresie kiełkowania oraz przez trzy miesiące od wschodów. W kolejnych latach silny system kłączy wytwarzanych przez rośliny pozwala na dobre wykorzystanie jesiennych i zimowych rezerw wody, w wyniku czego pierwszy pokos jest mniej zależny od wiosennych opadów. Posuchy występujące w okresie letnim znacząco ograniczają plon kolejnych pokosów. Szkodliwy jest również wysoki poziom wód gruntowych oraz długotrwałe zalewanie zasiewów trwające ponad 12–18 dni [133].

Wymagania glebowe rutwicy wschodniej nie są duże. Nadaje się do uprawy na różnych typach gleb od I do V klasy bonitacyjnej. Najlepsze warunki do rozwoju i plonowania znajduje na glebach o pH powyżej 5,5 [368]. Jej plantacje najlepiej zakładać na glebach wapiennych (np. rędzinach), a także na glebach gliniasto-piaszczystych lub piaskach położonych na glinach oraz na czarnych ziemiach w dolinach rzecznych o średniej żyzności. Gatunek ten słabo rośnie na piaskach i glebach zabagnionych [133].

**Wymagania agrotechniczne.** Wymagania agrotechniczne rutwicy są jeszcze mało poznane. Rodzaje zabiegów przygotowujących glebę do uprawy tej rośliny są zależne od przedplonu, grubości warstwy ornej i zachwaszczenia pola. Ze względu na długi okres jej użytkowania najlepszym przedplonem są rośliny okopowe uprawiane na nawozach organicznych. Można ją również uprawiać po zbożach, kukurydzy i różnych mieszankach przeznaczonych na paszę. Ważne, aby roślina przedplonowa była dobrze odchwaszczona. Pod rutwicę należy jesienią wykonać orkę przedzimową, a wczesną wiosną (w zależności od zwięzłości gleby) przeprowadzić włókovanie lub bronowanie oraz płytkie kultywatorowanie. Między kolejnymi zabiegami przedsięwziętymi niszczącymi chwasty należy wysiać nawozy mineralne (jeśli nie zastosowano ich pod orkę przedzimową) oraz wymieszać z glebą za pomocą brony [368].

Hołubowicz-Kliza [133] wskazuje, że wymagania pokarmowe rutwicy wschodniej zbliżone są do koniczyny łąkowej. Jako roślina bobowa nie wymaga bezpośredniego nawożenia organicznego, najlepiej zrobić to pod przedplon. Rutwica nie ma zbyt dużych potrzeb nawozowych, jednak korzystnie reaguje na nawożenie fosforem i potasem. W badaniach Sienkiewicza i in. [302] nawożenie tymi składnikami powodowało istotny wzrost plonu biomasy rut-



wicy w porównaniu do obiektów nienawożonych. Nawożenie fosforem i potasem w dawkach 40 kg  $P_2O_5$  i 80 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  zwiększało wydajność biomasy rutwicy o  $3,7 t \cdot ha^{-1}$ , a nawożenie wynoszące 120 kg  $P_2O_5$  i 240 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  powodowało wzrost wydajności o kolejne  $2,8 t \cdot ha^{-1}$ . W badaniach Symanowicz i Kalembasy [320] średni plon suchej masy rutwicy wschodniej był istotnie zróżnicowany zastosowanymi poziomami nawożenia fosforowo-potasowego. Najwyższy plon rutwicy w 3-letnim cyklu badań, wynoszący  $10,6 t \cdot ha^{-1}$ , uzyskano pod wpływem nawożenia wynoszącego 50 kg  $P_2O_5$  i 200 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ .

Chociaż rutwica wschodnia dobrze toleruje uprawę na glebach kwaśnych, to zaleca się przed założeniem plantacji przeprowadzić wapnowanie pola wapnem magnezowym w dawce  $1-2 t \cdot ha^{-1}$ . Odczyn zbliżony do obojętnego korzystnie wpływa na kiełkowanie nasion i wspomaga wiązanie azotu atmosferycznego przez bakterie brodawkowe [133].

W Polsce brakuje materiału siewnego tego gatunku. Rutwica jest młodą rośliną uprawną. Hodowlę prowadzi wyłącznie ośrodek UTP w Bydgoszczy – dr Stanisław Ignaczak. Wychodowano tam odmianę Risa, którą wpisano w 2002 roku do Księgi Wyłącznego Prawa do Odmiany. Obecnie trwają badania rejestrowe, które rozpoczęły się w 2010 roku [376]. Do uprawy w Polsce polecana jest także znana w krajach nadbałtyckich rosyjska odmiana Gale. W obrocie materiałem siewnym można spotkać również inne odmiany rosyjskie (Górnoałyjski 87, Wnijuk, Jałginski, Yelyaty, Magister, Tiumeński, Bimbołat), litewskie (Vidmantai, Laukiai, Melsviai), a nawet z terenów byłej Jugosławii (Yu Margarita) [66]. Niska produkcyjność nasienna tej rośliny jest ograniczona słabym wiązaniem strąków w owocostanach [141].

Niekorzystną cechą materiału siewnego rutwicy wschodniej jest duży udział (od 50 do 98%) nasion twardych. Powoduje to nierównomierne ich kiełkowanie i straty materiału siewnego [345]. Z tych względów nasiona przed siewem należy poddać procesowi skaryfikacji. Twardość nasion można zmniejszyć przez uszkodzenie okryw nasiennych metodami mechanicznymi, chemicznymi lub termicznymi. W badaniach Tworkowskiego i in. [345] skaryfikacja nasion poprawiała jakość materiału siewnego. Z porównywanych metod najskuteczniejsza była skaryfikacja chemiczna (moczenie nasion w kwasie siarkowym), po której w polu wschodziło od 61 do 71% wysiewanych nasion, natomiast najmniejszą liczbę wzeszłych roślin (ok. 45%) uzyskano po skaryfikacji mechanicznej. Skaryfikowane nasiona bezpośrednio przed wysiewem należy zaprawić bakteriami *Rhizobium galegae*, które nie zasiedlają polskich gleb w warunkach naturalnych [338]. W badaniach z nasionami infekowanymi tymi bakteriami średnie plony suchej masy wynosiły  $10,2 t \cdot ha^{-1}$ , a z obiektów nieinfekowanych plony suchej masy były istotnie niższe ( $5,35 t \cdot ha^{-1}$ ) [169].

Rutwica wymaga średniowczesnego, wiosennego siewu, a jego termin wyznacza temperatura wierzchniej warstwy gleby ( $6-7^{\circ}C$ ). Najwyższe plony

biomasy zapewniają plantacje zakładane w maju. Rutwica wysiewana w okresie letnim (czerwiec–sierpień) odznacza się słabym początkowym wzrostem i rozwojem. Rośliny wykazują jasnozielone zabarwienie, a zasiewy łatwo się zachwaszczają. Siewy późnoletnie (sierpień–wrzesień) nie są zalecane w warunkach klimatycznych Polski, gdyż słabo zaawansowane w rozwoju przed zimą rośliny cechują się słabą odpornością na mrozy i mogą wymarzać. Najlepszymi roślinami ochronnymi rutwicy wschodniej są pszenżyto jare i owies. Przewaga tych gatunków nad jęczmieniem jarym wynika z mniejszej ich krzewistości oraz mniejszych wymagań glebowych [368]. Gęstość siewu rutwicy winna wynosić 300–500 nasion na 1 m<sup>2</sup> (20–30 kg · ha<sup>-1</sup>). Masę wysiewu zbożowej rośliny ochronnej należy zmniejszyć o 20–50% w porównaniu z uprawą na ziarno. Roślinę ochronną najlepiej zbierać od fazy kłoszenia do dojrzałości młecznicy [368].

Zaleca się uprawiać rutwicę w mieszankach z trawami, przy czym do mieszanek należy wybierać mniej agresywne gatunki traw, np. tymotkę łąkową. Rutwicę można też uprawiać bez rośliny ochronnej. Najlepsze efekty w wydajności roślina ta uzyskuje w uprawie szerokokorędowej, z międzyrzędziami wynoszącymi 45–60 cm. Daje to oszczędność materiału siewnego (masa wysiewu 7–10 kg · ha<sup>-1</sup>, głębokość 1–2 cm) [24]. Optymalna obsada roślin w uprawie na fitomasę powinna zapewnić na 1 m<sup>2</sup> zagęszczenie wynoszące 400–450 pędów [387].

Wschody rutwicy pojawiają się po 8–10 dniach od siewu. Początkowy wzrost i rozwój roślin przebiega bardzo powoli, co sprzyja zachwaszczeniu plantacji i wymusza wykonywanie zabiegów pielęgnacyjnych. W Polsce nie ma zarejestrowanych środków ochrony roślin do stosowania w zasiewach rutwicy. W siewie monogatunkowym w uprawie szerokokorędowej w pierwszym roku wegetacji możliwa jest mechaniczna walka z zachwaszczeniem, polegająca na 2–3-krotnym spulchnianiu międzyrzędzi. Zabieg ten należy wykonywać ostrożnie i niezbyt głęboko po 10–15 dniach od pojawienia się pierwszych chwastów, gdy rośliny osiągną 3–4 cm wysokości. Powtórne spulchnianie międzyrzędzi przeprowadza się po 20–25 dniach. Następne zabiegi wykonuje się w zależności od szybkości pojawiania się chwastów lub tworzenia skorupy glebowej. W kolejnych latach użytkowania rutwica uprawiana bez rośliny ochronnej dzięki licznym rozłogom rozrasta się w międzyrzędziach, co czyni ją mniej podatną na zachwaszczenie. W uprawie wsiewkowej w roślinę ochronną regulacja zachwaszczenia ogranicza się do wiosennego bronowania plantacji [133]. Z dotychczasowych badań wynika, że rutwica wschodnia, poza chwastami, nie jest narażona na presję ze strony innych agrofagów [280, 281].

W pierwszym roku uprawy rutwicy wschodniej przeprowadza się tylko jeden zbiór biomasy pod koniec września. Zbyt wczesne jej koszenie w roku siewu powoduje przerzedzanie się roślin [133]. W kolejnych latach uprawy

rutwica charakteryzuje się szybkim wiosennym odrastaniem pędów. Pełnię rozwoju osiąga w 2–3 roku użytkowania [140]. Z wielu badań wynika, że wysoki poziom jej plonowania utrzymuje się do 7–8 roku jej użytkowania [142, 144, 169, 302]. W użytkowaniu kośnym rutwica daje przeważnie 2, niekiedy 3 pokosy biomasy w roku, z których pierwszy jest bogato ulistniony i zapewnia zbiór fitomasy już w maju. W dobrych warunkach wilgotnościowych w okresie wegetacji (mokre lato) można ją kosić trzykrotnie: pierwszy pokos pod koniec maja, drugi – na początku sierpnia, a trzeci – we wrześniu. Najwyższe plony fitomasy uzyskuje się podczas zbioru w stadiach od początku do pełni kwitnienia, a najwyższy plon suchej masy daje zbiór pod koniec kwitnienia. Zbiór pierwszego pokosu wykonuje się na wysokości 8–10 cm. Taka wysokość koszenia wpływa pozytywnie na dalsze odrastanie roślin. Następne pokosy kosi się niżej (6–8 cm) [142]. Rutwica cechuje się dużym udziałem liści w plonie suchej masy, który w zależności od zbieranego pokosu wynosi od 49 do 71%. Pierwszy pokos charakteryzuje się niższym ich udziałem w plonie wynoszącym około 50%, natomiast w drugim pokosie liście stanowią od 65 do 71% zbieranej biomasy [140].

Najkorzystniejszy jest zbiór rutwicy w fazie kwitnienia. Symanowicz i in. [321] najwyższe plony suchej masy ( $19,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) uzyskali z rutwicy zbieranej pod koniec kwitnienia. Zbiór w stadium pełni kwitnienia zapewniał plon wynoszący  $15,2 \text{ t}$  suchej masy z 1 ha, a w fazie pąkowania wydajność była najmniejsza i wyniosła  $8,9 \text{ t}$  suchej masy z 1 ha. W całorocznym zbiorze rutwicy największy plon zapewnia pierwszy pokos. W badaniach Sienkiewicza i in. [302] jego udział w plonie rocznym wynosił do 70%. Również w badaniach Symanowicz i Kalembasy [320] największą wydajność suchej masy zapewniał zbiór pierwszego pokosu ( $4,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), co stanowiło 48% plonu rocznego. Drugi pokos stanowił 30%, a trzeci – 22%. Generalnie wydajność biomasy obniża się istotnie w kolejnych latach użytkowania rutwicy.

Po zbiorze nasion, który ma miejsce w pierwszym pokosie (najczęściej na początku sierpnia), w warunkach dobrego uwilgotnienia i dostępności składników pokarmowych w glebie następuje bujny odrost drugiego pokosu. Odrost ten dostarcza wartościowej fitomasy z dominującym udziałem liści. Ignaczak [142] podaje, że jesienny odrost po zbiorze nasion może wynieść  $12,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  świeżej masy przy 70% udziale liści, który należy uznać za duży i rzadko spotykany w plonach innych roślin pastewnych tworzących łądygi.

Technologia zbioru i konserwacji biomasy z rutwicy jest podobna jak u lucerny siewnej. Kiszonkę można sporządzać w belach cylindrycznych, silosach i przyzmach szczelnie przykrytych folią.

### 2.4.3. Kupkówka pospolita (*Dactylis glomerata*) i tymotka łąkowa (*Phleum pratense* L.)

Ruń krótkotrwałych zasiewów cechuje się zazwyczaj znacznym uproszeniem, bowiem tworzy ją jeden lub kilka (z reguły 2–3) intensywnych gatunków. Grupa traw mająca istotne znaczenie w produkcji biomasy na użytkach przemiennych jest stosunkowo nieliczna [50]. Z występujących w Polsce około 200 gatunków traw do intensywnej uprawy w warunkach polowych nadaje się 15–20 gatunków, spośród których praktyczne znaczenie ma tylko kilka [369]. Najwartościowsze gatunki ze względu na wielkość uzyskiwanych plonów to życice (wielokwiatowa, trwała, westerwoldzka, mieszańcowa), kostrzewa łąkowa, tymotka łąkowa i *festulolium*. Gatunki te mają znaczne wymagania w stosunku do siedliska. Najlepiej rosną na glebach żyznych i wilgotnych. Mniej wymagającymi trawami są: kupkówka pospolita, rajgras wyniosły, stokłosa uniolowata i kostrzewa trzcinowa. Mogą być one uprawiane na glebach średnich i lżejszych oraz w rejonach o mniejszej ilości opadów [375].

**Biologia.** Kupkówka pospolita (*Dactylis glomerata* L.) jest gatunkiem o ważnym znaczeniu gospodarczym w polskich warunkach siedliskowych, pomimo wielu ujemnych cech (szybkie tempo odkładania lignin i celulozy, nadmierna konkurencyjność). Związane jest to z jej wielostronnym zastosowaniem, dobrą trwałością i żywotnością, szybkim odrastaniem po zbiorze, niezbyt dużymi wymaganiami glebowymi oraz dużą odpornością na suszę [26, 27, 127]. Zachowuje też stosunkowo dużą, w porównaniu z innymi gatunkami, stabilność i wierność plonowania oraz odporność na zachwaszczenie [237]. Kupkówka pospolita uprawiana na gruntach ornych może osiągać plony przekraczające 15 t suchej masy z hektara pod warunkiem zaspokojenia jej wysokich potrzeb pokarmowych i wodnych [75]. Dzięki szybkiemu wzrostowi w okresie wiosennym zalicza się do traw wczesnych, gdyż jest pierwszą trawą, z której można pozyskać biomasę. Pełnię plonowania osiąga już w pierwszym roku użytkowania i w odpowiednich warunkach glebowo-klimatycznych można ją uprawiać nawet przez 7–10 lat. Po pięciu latach uprawy zmniejsza się jej vitalność, przez co plony w latach następnych są mniej stabilne. Kupkówka pospolita jest wieloletnim gatunkiem zaliczanym do traw luźnokępkowych. Posiada dobrze rozwinięty system korzeniowy typu wiązkowego, który wnika w glebę na głębokość ponad 100 cm, a poziomy zasięg korzeni dochodzi do 40 cm [369]. Liście ma szerokie i długie, w pączku złożone. Pędy generatywne w uprawie polowej osiągają wysokość od 60 do 90 cm, a w dobrych warunkach nawet do 130 cm (sporadycznie 150 cm) [70]. Tak wysokie pędy odznaczają się dużą skłonnością do wylegania. Kwiatostanem kupkówki pospolitej jest jednostronna wiecha właściwa. Jako gatunek silnie

konkurencyjny i ekspansywny w uprawie w mieszankach wypiera z runi inne gatunki traw [369]. Jej wartość użytkowa w 10-stopniowej skali oceniana jest na 9.

Tymotka łąkowa (*Phleum pratense* L.) występuje powszechnie na trwałych i krótkotrwałych użytkach zielonych niezbyt intensywnie użytkowanych [322]. Jej wydajność użytkowa mieści się w przedziale 8–15 t suchej masy z hektara [369]. Tymotka łąkowa zaliczana jest do traw luźnokępkowych. Jej wiązkowy system korzeniowy sięga do 75–100 cm w głąb gleby. Główna masa korzeniowa (80%) znajduje się w wierzchniej jej warstwie (0–5 cm), przez co wykazuje znacznie większą wrażliwość na brak wilgoci w glebie niż kupkówka pospolita. Pędy generatywne osiągają zróżnicowaną wysokość (30–60 cm). W 10-stopniowej skali posiada maksymalną liczbę wartości użytkowej [375]. Nadaje się do użytkowania w mieszankach ze względu na małą ekspansywność w stosunku do innych roślin, np. motylkowych drobnonasiennych.

**Wymagania siedliskowe.** Kupkówka pospolita nadaje się do uprawy w różnych warunkach glebowych i wodnych na terenie całego kraju. Bardzo dobrym stanowiskiem są gleby zaliczane do kompleksów od pszennego bardzo dobrego do żytniego dobrego i zbożowo-pastewnego słabego. Gleby należące do kompleksu żytniego słabego zaliczane są do średnio przydatnych, a zbożowo-pastewnego mocnego do mało przydatnych [313]. Gatunek ten w szczególności nadaje się na gleby lekkie i suche. Kupkówka pospolita jest trawą nie tolerującą gleb kwaśnych. Przydatność do uprawy na glebach lekkich i suchych wynika z oszczędnego gospodarowania wodą i niskiego współczynnika transpiracji. Gatunek ten na wytworzenie 1 kg suchej masy zużywa 250–400 litrów wody [369].

Z kolei tymotka łąkowa do uprawy wymaga gleb żyznych, odpowiednio wilgotnych i nie przesycających przez dłuższe okresy. Dlatego najlepiej plonuje na gliniastych glebach w całym kraju i dobrze zmeliorowanych, lecz nie przesuszonych glebach torfowych. Najlepszymi glebami do uprawy tymotki łąkowej są gleby zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego, żytniego bardzo dobrego i zbożowo-pastewnego mocnego. Gleby zaliczone do kompleksu żytniego dobrego są średnio przydatne, a nie należy uprawiać tego gatunku na glebach zaliczanych do kompleksu pszennego wadliwego, żytniego słabego i zbożowo-pastewnego słabego. Jest dość tolerancyjna na odczyn gleby, jednak najlepsze warunki do rozwoju znajduje na glebach o odczynie lekko kwaśnym. Gatunek ten bardzo dobrze znosi zarówno grubą i długotrwałą pokrywą śnieżną, jak i ostre i bezśnieżne zimy. Posuchy w okresie letnim ograniczają liczbę wykształczanych pędów i powodują wolniejsze ich odrastanie. Podczas długotrwałego niedoboru wody część roślin zasycha i ginie. Tymotka łąkowa należy do roślin odpornych na krótkotrwałe, trwające 10–15 dni zalewy, lecz na glebach ze stagnującą wodą szybko zanika [369].

**Wymagania agrotechniczne.** Ogólnie trawy nie mają specjalnych wymagań pod względem stanowiska, a o jego wyborze decyduje głównie termin i sposób siewu, co umożliwiałoby ich uprawę po różnych przedplonach [57]. Kupkówka pospolita i tymotka łąkowa najlepiej udają się po roślinach okopowych uprawianych na oborniku. W praktyce jednak, zwłaszcza w siewach wiosennych, wysiewane są najczęściej w płodozmianach polowych jako drugi w kolejności gatunek po roślinach okopowych, gdyż najczęściej stanowią wsiewkę w zboża. Stanowisko pod ich uprawę powinno być przede wszystkim wolne od chwastów rozłogowych, głównie perzu właściwego.

Przygotowanie pola pod wiosenny siew traw należy rozpocząć już jesienią od wykonania głębokiej orki przedzimowej [313]. Wiosenne prace polowe można ograniczyć do bronowania w celu wyrównania jego powierzchni i przetrwania parowania wody. Bronowanie można poprzedzić wysianiem nawozów mineralnych.

Jeżeli trawy wysiewane są w terminie późnoletnim, wówczas po zbiorze przedplonu wykonuje się zrywanie ścierni, następnie orkę siewną, a po niej wskazane jest wykonanie wałowania wałem pierścieniowym w celu szybszego osiadania roli. Kolejnym zabiegiem jest płytkie doprowadzenie roli i wysianie nasion. Po siewie wymagane jest również staranne wałowanie roli wałem gładkim w celu zwiększenia podsiąku wody do płytko zalegających pod powierzchnią pola nasion [313].

W polskich warunkach gospodarczo-ekonomicznych nowe odmiany traw powinny charakteryzować się wysokimi plonami biomasy, dużą trwałością, wysoką zdrowotnością roślin i odpornością na suszę [69]. Odmiany traw przeznaczonych do krótkotrwałego, ale intensywnego użytkowania kośnego powinny charakteryzować się silną krzewistością i dobrym ulistnieniem, a także zapewniać wysoki plon świeżej i suchej masy, łatwo odrastać po skoszeniu, być wytrzymałe na niesprzyjające warunki środowiska i odporne na choroby grzybowe. Powinny też odznaczać się dużą produktywnością w 2–3 latach uprawy, nawet kosztem ich wytrzymałości na mroźne zimy [236]. Jakość użytkowa polskich odmian traw znacznie przewyższa zagraniczne, zwłaszcza pod względem ich reakcji na niekorzystne warunki klimatyczne [187].

Wśród krajów Unii przodującą rolę w nasiennictwie traw odgrywa Holandia [279]. W Europie największymi producentami nasion tymotki łąkowej są Finlandia, Szwecja i Niemcy [255]. W 2012 roku do Krajowego Rejestru Odmian Roślin Rolniczych wpisanych było 13 odmian kupkówki pospolitej i 19 odmian tymotki łąkowej [210].

Kupkówkę i tymotkę można wysiewać w terminie wiosennym (marzec–kwiecień) i późnoletnim (sierpień). Wysiew w terminie późniejszym może być przyczyną wymarzenia młodych roślin. W praktyce rolniczej przeważnie spotykany jest siew wiosenny w roślinie ochronnej, którą najczęściej są zboża. Siew

bez rośliny ochronnej zalecany jest w terminie późnoletnim. Przewaga uprawy traw jako wsiewki w zbożową roślinę ochronną wynika z ich dobrej tolerancji na zacienianie (większej niż motylkowate drobnonasienne) i możliwości ich odchwaszczania herbicydami. Zboża jako rośliny ochronne mogą być zbierane na ziarno lub biomasę. Dzięki temu podnoszą efektywność ekonomiczną uprawy trawy w roku siewu, ponieważ poza pokosem ściernianki uzyskuje się dodatkowy plon ziarna lub fitomasy [57]. Trawy nadają się też do siewu jesiennego jako wsiewka w żyto ozime przeznaczone na międzyplon ozimy. Taka uprawa traw, oprócz plonu biomasy kiszonkarskiej żyta, daje w danym roku dodatkowo dwa pokosy biomasy z traw. Kupkówkę i tymotkę, bez względu na termin i sposób siewu, należy wysiewać w rozstawie 10–15 cm na głębokość 1–2 cm. Wysiew traw w zboża, jako roślinę ochronną, należy wykonać w poprzek rzędów zbóż w tym samym dniu w dwóch oddzielnych przejazdach siewnika. Łączny wysiew nasion (traw i zbóż) jest nierównomierny i mało precyzyjny, najczęściej za głęboki dla traw. Masa wysiewu kupkówki pospolitej wynosi 15–22 kg · ha<sup>-1</sup>, a tymotki łąkowej – 10–15 kg · ha<sup>-1</sup> [31]. Na glebach słabych i suchych ilość wysiewu kupkówki można zwiększyć do 25 kg · ha<sup>-1</sup>, szczególnie przy siewie późnoletnim. Tymotka łąkowa charakteryzuje się niskim polowym wskaźnikiem wschodów, o czym świadczą badania Szczepanek [322], gdzie wskaźnik ten u tymotki wsiewanej w jęczmień jary wynosił zaledwie 20%. Tak niska polowa zdolność ich kiełkowania świadczy o dużej wrażliwości bardzo drobnych nasion tego gatunku na obecność rośliny ochronnej, staranność przygotowania gleby i głębokość siewu. Szczepanek [322] za innymi autorami podaje, że podczas siewu tymotki z jej nasion bardzo łatwo odpadają plewki, co zwiększa ich podatność na działanie patogenów i znacząco obniża polową zdolność wschodów. Wschody kupkówki w dobrych warunkach wilgotnościowych widoczne są po 10–14 dniach od siewu. Początkowy rozwój tymotki jest powolny, a stan pełnego rozwoju osiąga dopiero po 2–3 latach wegetacji [369].

Wapnowanie należy wykonać tylko w przypadku uprawy na glebach silnie zakwaszonych (o pH poniżej 5,5) przed siewem, a najlepiej pod przedplon [313]. Nawożenie mineralne wpływa na wysokość i jakość plonów biomasy traw w uprawie polowej. Ze składników pokarmowych najbardziej plonotwórczym składnikiem pokarmowym dostarczanym w nawozach mineralnych jest azot [150]. Pobudza on procesy wzrostu, wpływa korzystnie na krzewistość roślin, zwiększa powierzchnię asymilacyjną, a w efekcie produkcję fotosyntetyczną. Azot jest też składnikiem syntezy wielu ważnych związków niebiałkowych zaangażowanych bezpośrednio w metabolizm roślin, przez co ma podstawowe znaczenie w kształtowaniu plonu roślin [252]. Odpowiednie zaopatrzenie roślin w azot i pozostałe składniki pokarmowe to podstawowy warunek umożliwiający osiąganie wysokich plonów biomasy [195]. Zajac [369] podaje, że

nawożenie mineralne pod kupkówkę pospolitą w pierwszym roku uprawy powinno wynosić: 40–80 kg  $P_2O_5$ , 80–160 kg  $K_2O$  i 60 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . W kolejnych latach uprawy nawożenie pogłównie azotem wykonuje się pod każdy pokos w ilości 60–80 kg  $N \cdot ha^{-1}$ , co w zupełności powinno wystarczyć do wykorzystania jej możliwości produkcyjnych. Ten sam autor pod tymotkę łąkową zaleca stosować 30–60 kg  $P_2O_5$ , 40–80 kg  $K_2O$  i 120–150 kg  $N \cdot ha^{-1}$  (połowę dawki azotu pod pierwszy pokos, a resztę w równych dawkach pod kolejne pokosy). W przypadku uprawy traw jako wsiewki w roślinę ochronną dawki nawozów mineralnych należy zwiększyć o 25% w porównaniu do siewu czystego [57].

W badaniach Kryszaka i in. [195] najwyższe plony suchej masy tymotki łąkowej ( $14,6 t \cdot ha^{-1}$ ) zapewniało nawożenie mineralne wynoszące 150 kg  $N$ , 80 kg  $P_2O_5$  i 120 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$ . Nawożenie tylko azotem skutkowało istotnym zmniejszeniem plonu suchej masy do  $13,1 t \cdot ha^{-1}$ , fosforem i potasem – do  $8,3 t \cdot ha^{-1}$ , azotem i potasem – do  $12,1 t \cdot ha^{-1}$ , a w obiektach nie nawożonych plony suchej masy wynosiły tylko  $6,2 t \cdot ha^{-1}$ . W badaniach Bednarka [19] nad wpływem nawożenia fosforem i potasem na plonowanie tymotki łąkowej wykazano, że zastosowanie 100 kg  $K_2O$  i 200 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  zapewniało plony suchej masy na poziomie  $10,4 t \cdot ha^{-1}$ . Dopiero dawka potasu wynosząca 300 kg  $K_2O \cdot ha^{-1}$  istotnie zwiększała jej plony do  $10,7 t \cdot ha^{-1}$ . Wzrastające nawożenie fosforowe z 80 do 160 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$  nie powodowało istotnego wzrostu plonu suchej masy (odpowiednio  $10,8$  i  $10,7 t \cdot ha^{-1}$ ), natomiast na dawce 240 kg  $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$  plon suchej masy tymotki obniżył się istotnie do  $10,0 t \cdot ha^{-1}$ .

Kupkówka pospolita należy do traw azotolubnych, więc silnie reagujących zwyżką plonu na wzrastające nawożenie azotem, natomiast tymotka łąkowa spośród uprawnych gatunków traw charakteryzuje się najmniejszą nitrofilnością. W badaniach Kaczora i Zuziańskiej [166] wzrastające nawożenie azotem przyczyniało się do istotnego wzrostu plonu suchej masy kupkówki pospolitej we wszystkich latach badań. W pierwszym roku uprawy na dawce azotu wynoszącej 90 kg  $N \cdot ha^{-1}$  plon suchej masy wynosił  $9,5 t \cdot ha^{-1}$ . Zwiększenie dawki azotu do 135 kg  $N$  spowodowało wzrost jej plonowania do  $10,7 t \cdot ha^{-1}$ , a do 180 kg  $N$  – do  $12,0 t \cdot ha^{-1}$ . W drugim roku uprawy plony kupkówki były znacząco wyższe niż w pierwszym i w kolejności dawek azotu wynosiły: 18,1 t, 20,1 t i  $21,9 t \cdot ha^{-1}$  suchej masy. W trzecim roku prowadzenia plantacji plony kupkówki w kolejności stosowanych dawek azotu wyraźnie malały i wynosiły: 11,1 t, 14,3 t i  $15,4 t \cdot ha^{-1}$  suchej masy. Kozłowski i Swędrzyński [188] najwyższe plony kupkówki pospolitej, wynoszące  $16,7 t \cdot ha^{-1}$  suchej masy, uzyskali w pierwszym roku użytkowania przy nawożeniu azotem w dawce 360 kg  $N \cdot ha^{-1}$ . Na dawce 240 kg  $N \cdot ha^{-1}$  plon obniżył się do  $14,8 t \cdot ha^{-1}$  suchej masy. W drugim roku użytkowania na dawce 240 kg  $N \cdot ha^{-1}$  uzyskano



12,5 t · ha<sup>-1</sup>, a w trzecim – 11,2 t · ha<sup>-1</sup> suchej masy. Zwiększenie dawki azotu o 120 kg N · ha<sup>-1</sup> w drugim roku użytkowania zwiększało plon o 2,1 t · ha<sup>-1</sup>, a w trzecim o 2,3 t · ha<sup>-1</sup> suchej masy. Wyniki potwierdzające istotny wzrost plonów kupkówki pospolitej pod wpływem zwiększania dawek azotu uzyskali również Dudek i in. [75]. W trzyletnim cyklu badań kupkówka nie nawożona azotem uzyskała plon suchej masy wynoszący 6,0 t · ha<sup>-1</sup>, na dawce 90 kg N · ha<sup>-1</sup> jej plony były istotnie wyższe i wynosiły 14,8 t · ha<sup>-1</sup>, a na dawce 180 kg N · ha<sup>-1</sup> – 18,3 t · ha<sup>-1</sup>.

Tymotka łąkowa, podobnie jak kupkówka pospolita, na zwiększanie nawożenia azotem reaguje wzrostem wydajności biomasy. Bednarek [19], stosując nawożenie azotem w dawce 120 kg N · ha<sup>-1</sup>, otrzymał średnio z trzech lat badań plon suchej masy wynoszący 8,8 t · ha<sup>-1</sup>. Podwojenie dawki azotu istotnie zwiększało plon do 10,7 t · ha<sup>-1</sup>, a dawka wynosząca 360 kg N · ha<sup>-1</sup> skutkowała wzrostem plonu suchej masy do 12,0 t · ha<sup>-1</sup>.

W kształtowaniu wielkości i jakości plonu biomasy traw ważną rolę odgrywa siarka [269]. Pierwiastek ten jest ważny z racji jego dużej roli w gospodarce azotowej roślin [86]. Jego niedobór w glebie wywołuje w roślinach kumulację azotu w formach niebiałkowych, a także obniża plonotwórcze działanie azotu [224]. W badaniach Kaczora i Zuzańskiej [166] aplikacja siarki, niezależnie od zastosowanej dawki, zwiększała plon kupkówki pospolitej. Statystycznie udowodniony przyrost plonu kupkówki odnotowano w drugim pokosie pierwszego roku uprawy, w drugim pokosie drugiego roku uprawy oraz w drugim i trzecim pokosie w trzecim roku uprawy. Wpływ siarki na plon kupkówki pospolitej wykazywał związek z wysokością zastosowanych dawek azotu. Niezależnie od odrostu najwyższe plony biomasy uzyskano przy najwyższej dawce siarki (30 kg S · ha<sup>-1</sup>) i najwyższej dawce azotu (180 kg N · ha<sup>-1</sup>).

Pielęgnowanie monogatunkowych zasiewów traw ogranicza się do likwidacji zachwaszczenia głównie w pierwszym roku uprawy. Jeśli chwasty nie występują masowo i nie zagrażają wypadaniu traw z porostu, wystarczy jedno lub dwukrotne ich przykoszenie w roku siewu. Szczególnie starannego odchwaszczania wymaga tymotka łąkowa, która charakteryzuje się powolnym początkowym wzrostem. Przy silnym zachwaszczeniu można stosować herbicydy. W następnych latach użytkowania w przypadku silnego zachwaszczenia plantacji (szczególnie chwastami dwuliściennymi) można wiosną po ruszeniu wegetacji na dobrze rozkrzewione trawy zastosować chemiczną walkę z chwastami [313]. W zasadzie od drugiego roku prowadzenia plantacji zabiegi uprawowe na przemiennych użytkach zielonych sprowadzają się do nawożenia mineralnego i zbioru biomasy [369].

Pełnia plonowania traw ma miejsce w drugim roku po siewie [57]. W latach pełnego użytkowania kupkówki pierwszy pokos biomasy zbiera się na początku

fazy kłoszenia roślin, a następne pokosy w zależności od tempa jej odrastania. W odpowiednich warunkach wilgotnościowych i właściwym zaopatrzeniu roślin w składniki pokarmowe zbiór kolejnych pokosów przeprowadza się najczęściej co 6 tygodni. Tymotka łąkowa, ze względu na jej powolny początkowy wzrost, wykazuje późniejsze kłoszenie niż kupkówka i dlatego termin zbioru jej pierwszego pokosu jest późniejszy. Jej większa wrażliwość na niedobory wody w okresie letnim powoduje wolniejsze odrastanie runi, przez co jej zasiewy użytkuje się z mniejszą częstotliwością [313]. Najbardziej odpowiednią formą konserwowania biomasy traw przeznaczanych na cele biogazowe jest sporządzanie kiszonek i sianokiszonek [383].

#### **2.4.4. Mieszanki lucerny siewnej (*Medicago sativa* L.) i koniczyny łąkowej (*Trifolium pratense* L.) z tymotką łąkową (*Phleum pratense* L.)**

Mieszanki bobowo-trawiaste, których komponentami są najczęściej lucerny lub koniczyny z trawami, stanowią bardzo produktywną formę pozyskiwania fitomasy roślinnej. Ich uprawa energetyczna może mieć znaczenie w systemie rolnictwa konwencjonalnego i integrowanego.

Uprawa mieszanek ma uzasadnienie ze względu na liczne korzyści. Główną przesłanką jest uzyskiwanie wyższego i bardziej stabilnego poziomu plonowania niż zasiewów jednogatunkowych, szczególnie w zmiennych warunkach siedliska, przez co mniejsze jest ryzyko ich uprawy [312]. Wyższy i wierniejszy poziom plonowania mieszanek wynika z ograniczenia konkurencji wewnątrzgatunkowej, zróżnicowania dynamiki wytwarzania biomasy i wykorzystywania składników pokarmowych z różnych warstw gleby [124]. Ważnymi zaletami takiej uprawy są mniejsze wymagania glebowe komponentów niż roślin bobowych uprawianych w czystym siewie, możliwość uprawy na terenie całego kraju czy wydłużenie okresu użytkowania roślin bobowych w mieszankach co najmniej o jeden rok. Zbiorowiska roślin motylkowo-trawiastych poprawiają strukturę gleby przez wytwarzanie zwartej darni z dużą masą korzeniową i przeciwdziałają erozji [53, 124]. Niedocenianą zaletą jest zdolność wiązania azotu atmosferycznego przez rośliny bobowe i obniżenie kosztów nawożenia tym składnikiem w porównaniu do jednogatunkowej uprawy traw. Z tych względów uprawa mieszanek nie wymaga stosowania dużych dawek nawozów mineralnych, zwłaszcza azotowych, a po ich zbiorze resztki roślinne wzbogacają glebę w substancję organiczną o korzystnym stosunku C:N. W gospodarstwach zdominowanych monokulturową uprawą zbóż zwiększają bioróżnorodność resztek poźniwnych, przez co działają fitosanitarnie na glebę i pozostawiają dobre stanowisko dla roślin następczych. Podczas zbioru mieszanek

i przygotowywania siana, kiszonki lub sianokiszonki występują też mniejsze straty wynikające z obłamywania liści roślin bobowych, a składniki łatwiej się zakiszają, ponieważ fitomasa ta jest bogatsza w cukry [392].

Dobór komponentów do mieszanek powinien uwzględniać takie ich cechy, jak trwałość komponentów, wymagania klimatyczne i glebowe, przydatność do sposobu i intensywności użytkowania, podobny rytm wzrostu i rozwoju, a także wzajemne oddziaływania konkurencyjne i kompensacyjne. Trwałość mieszanek zależy od trwałości komponentów najszybciej ustępujących z runi. W mieszkach uproszczonych (złożonych z dwóch lub trzech gatunków) wypadnięcie chociaż jednego komponentu powoduje znaczne przerzedzenie runi. Jego konsekwencją jest spadek wydajności i wzrost zachwaszczenia plantacji [64].

Z reguły trawy są w mieszkach bardziej konkurencyjne w stosunku do wieloletnich roślin motylkowych. Do najbardziej trwałych traw zalicza się kupkówkę pospolitą (*Dactylis glomerata*), a znaczną trwałością charakteryzuje się także tymotka łąkowa (*Phleum pratense*) [64]. Trawy uprawiane w mieszkach, np. z koniczyną łąkową, powinny mieć podobne wymagania siedliskowe [312]. Bobowe wieloletnie w mieszkach z trawami należy uznać za rośliny krótkotrwałe. Najdłużej w mieszkach utrzymuje się esparceta siewna i koniczyna białoróżowa. Lucerna siewna i mieszańcowa użytkowane kośnie udanie plonują przez 3–4 lata pełnego użytkowania, a malejący ich udział w runi w trzecim i czwartym roku użytkowania rekompensowany jest przez wzrost liczby źdźbeł z silnie krzewiących się traw. Najmniej trwałą wieloletnią rośliną bobową w mieszkach z trawami jest koniczyna łąkowa [64].

Koniczyna łąkowa (*Trifolium pratense* L.) należy do wysokobiałkowych roślin pastewnych z rodziny bobowatych (*Fabaceae*). Jest cennym gatunkiem w uprawie polowej ze względu na wzbogacanie gleby w azot i próchnicę [55]. Jest rośliną dwuletnią, wielokośną, uprawianą w zasiewach monogatunkowych lub w mieszkach z trawami. Gatunek ten reprezentowany jest przez odmiany diploidalne ( $2n = 14$  chromosomów) i tetraploidalne ( $2n = 28$  chromosomów). Odmiany tetraploidalne w porównaniu z diploidalnymi charakteryzują się bujniejszym wzrostem, ciemniejszym odcieniem zieleni, wyższymi łodygami oraz większymi liśćmi, kwiatostanami i nasionami. W Krajowym Rejestrze Odmian Roślin Rolniczych w 2012 roku znajdowało się 14 odmian koniczyny łąkowej, z czego aż 12 to diploidy. Tetraploidy dają większy plon fitomasy niż odmiany diploidalne, ale o niższej zawartości suchej masy [364]. W badaniach Ćwintala i Wilczka [59] tetraploidalna odmiana Karo i diploidalna odmiana Dajana wykazywały istotne różnicowanie w plonowaniu. Plony świeżej masy odmiany tetraploidalnej były wprawdzie istotnie wyższe (o  $6,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) niż odmiany diploidalnej, ale nie przekładały się na większy plon suchej masy, którym odmiany nie różniły się istotnie między sobą. Podobne zależności w plonowaniu form di- i tetraploidalnych uzyskali inni autorzy.

W badaniach Wilczka [360] tetraploidalna odmiana Bona w porównaniu z diploidalną odmianą Parada różniła się istotnie większym plonem świeżej masy (o  $4,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), ale jednocześnie charakteryzowała się istotnie mniejszym plonem suchej masy (o  $1,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Z kolei Borowiecki in. [33] wykazali w 3 z 6 punktów prowadzenia badań, że w zasiewach monogatunkowych odmiany tetraploidalne (Jubilatka i Radyka) istotnie przewyższały plonami suchej masy odmiany diploidalne (Nike i Hruszowska).

Formy koniczyny łąkowej wykazują różną reakcję w plonie na uprawę w mieszankach z trawami. Ścibor i Magnuszewska [342] nie stwierdziły różnic w plonowaniu di- i tetraploidalnych odmian koniczyny łąkowej uprawianej w mieszankach z trawami, co nie potwierdza większości doniesień o wyższym plonowaniu form tetraploidalnych. Z kolei Gawęł i Bawolski [95] wykazali, że mieszanki diploidalnych odmian koniczyny łąkowej z trawami plonowały istotnie niżej od mieszanek z odmianami tetraploidalnymi.

Plonowanie mieszanek w latach ulega dużym wahaniom, co zapewne wynika z trudności w utrzymaniu odpowiedniego udziału koniczyny w składzie mieszanki. Powodem jej ustępowania może być m.in. konkurencja ze strony traw i duża wrażliwość na zmienne warunki glebowo-klimatyczne [124]. W przypadku koniczyny łąkowej ważny jest też odpowiedni dobór odmian do mieszanek. Wyższym plonowaniem i lepszą trwałością w mieszankach charakteryzują się odmiany tetraploidalne, dlatego lepiej niż odmiany diploidalne nadają się do mieszanek z trawami [95]. Nowak i Sowiński [249] w pierwszym roku pełnego użytkowania koniczyny łąkowej z kupkówką pospolitą otrzymali istotnie wyższe plony mieszanki ( $14,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  suchej masy) niż koniczyny łąkowej w siewie monogatunkowym ( $13,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  suchej masy). W drugim roku pełnego użytkowania mieszanka plonowała na poziomie  $12,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  suchej masy, a wydajność samej koniczyny łąkowej znacząco się obniżyła i wyniosła  $10,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  suchej masy. Ścibor [341] w badaniach nad plonowaniem mieszanek koniczyny łąkowej (z 70% jej udziałem) z tymotką łąkową nie stwierdziła istotnych różnic w plonach suchej masy w zależności od warunków siedliskowych i lat użytkowania.

Do użytkowania kośnego mieszanek lucerny z trawami dobrym komponentem jest kupkówka pospolita i tymotka łąkowa [92]. Borowiecki [29] w badaniach nad mieszankami największe plony biomasy w pierwszym roku użytkowania uzyskał z mieszanki lucerny z kupkówką pospolitą, mniejsze z tymotką łąkową, a najmniejsze z zasiewów monogatunkowych lucerny. W drugim roku pełnego użytkowania różnice pomiędzy lucerną, a mieszankami zacierają się i w trzecim roku były już nieistotne.

**Wymagania siedliskowe.** Do uprawy mieszanek lucerny z trawami najlepiej nadają się gleby kompleksu pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego, pszennego wadliwego, żytniego bardzo dobrego, zbożowo-pastewnego

mocnego, pszennego górskiego. Należy unikać gleb nadmiernie mokrych i bagiennych, torfów, żwirowych i lekkich gleb kompleksu żytniego bardzo słabego, a także gleb zakwaszonych ze względu na duże wymagania w tym względzie lucerny [98]. Lucernę z trawami zaleca się uprawiać w stanowiskach pookopowych (na oborniku lub gnojowicy), zbożach ozimych i jarych oraz trawach. Dobrym przedplonem jest też kukurydza. Wybierając stanowisko, należy się upewnić, czy pozostałości herbicydów nie zahamują wschodów i rozwoju lucerny lub nie doprowadzą do zamierania roślin. Mieszanki w zmianowaniu mogą być uprawiane na tym samym polu dopiero po upływie 3–4 lat. Nie należy ich też uprawiać po roślinach bobowych wieloletnich i strączkowych [92].

Mieszanki koniczyny łąkowej z trawami powinny być uprawiane w warunkach siedliskowych korzystnych dla koniczyny. Warunkiem ograniczającym jest wystarczająca ilość wody w glebie, ponieważ koniczyna łąkowa i trawy zaliczają się do gatunków klimatu umiarkowanego, dla których korzystne są okresy chłodu i deszczowej pogody. Mieszanki te do równomiernego i wysokiego plonowania wymagają w okresie wegetacji częstych i równomiernie rozłożonych opadów. Wykazują natomiast dużą wrażliwość na niedobory wody i długotrwałe susze, szczególnie w okresie lata [97]. Z tego względu najlepsze warunki do ich uprawy są na glebach zaliczanych do kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego, pszennego górskiego, zbożowego górskiego, zwłaszcza gdy pH jest większe od 6,5. Dobre warunki zapewniają gleby zaliczane do kompleksu pszennego bardzo dobrego i pszennego dobrego o pH w granicach 6,5–6,8. Do średnich stanowisk należą gleby kompleksu żytniego bardzo dobrego (pH 5,6–6,0). Najsłabszym stanowiskiem są gleby kompleksu pszennego wadliwego i żytniego dobrego. Mieszanek koniczynowo-trawiastych nie należy uprawiać na glebach kompleksu żytniego słabego, żytniego bardzo słabego, zbożowo-pastewnego słabego, mających odczyn kwaśny (pH mniejsze niż 5,5), oraz na glebach o nieuregulowanych stosunkach wodnych.

Wielkość plonów suchej masy mieszanek koniczynowo-trawiastych uzależniona jest od typu gleby. Przydatność gleb do uprawy mieszanek koniczyny łąkowej z trawami potwierdzają badania Bawolskiego [18], który największe plony suchej masy koniczyny łąkowej uprawianej w mieszance z tymotką łąkową uzyskał na glebie kompleksu zbożowo-pastewnego mocnego ( $17,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), a najniższe na kompleksie pszennym wadliwym ( $8,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W rejonie północnej i wschodniej Polski polecana jest uprawa mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką łąkową, która w porównaniu z innymi gatunkami traw wykazuje małą konkurencyjność w stosunku do koniczyny.

**Wymagania agrotechniczne.** Bardzo dobrym przedplonem pod uprawę mieszanek koniczynowo-trawiastych są okopowe i zboża ozime, średnim i słabym przedplonem są zboża jare i trawy, a złym – rośliny bobowe. Stanowisko

pod ich uprawę powinno być odchwaszczone i wolne od pozostałości herbicydów [97]. Warunki siedliskowe dla koniczyny łąkowej uprawianej z trawami są korzystniejsze w południowych niż północnych rejonach Polski [30].

Jesienna uprawa roli, zasady wapnowania i wiosenne przygotowanie roli pod mieszanki lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z trawami są podobne jak dla lucerny w siewie czystym. Do zakładania plantacji należy używać wyłącznie kwalifikowanego materiału siewnego. Wyróżnia się dwa terminy i sposoby siewu mieszanek – wiosenny i letni. Wiosenny termin siewu obejmuje okres od połowy kwietnia do połowy maja, w którym siew można wykonywać bez rośliny ochronnej lub z rośliną ochronną. W terminie letnim – od czerwca do połowy lipca – siew wykonuje się bez rośliny ochronnej. Bardziej korzystny jest termin wiosenny. Siew bez rośliny ochronnej powinien być wykonywany szczególnie w warunkach siedliskowych mniej sprzyjających uprawie mieszanek, np. w terminie letnim, na słabszych glebach oraz w gorszych warunkach wilgotnościowych [97].

Najlepsze efekty daje siew wiosenny mieszanek metodą wsiewki w jęczmień jary uprawiany na ziarno lub w owies przeznaczony do zakiszania [98]. Młode siewki bobowych drobnonasiennych wykazują wrażliwość na chłody, dlatego wiosenny siew najlepiej wykonać po odpowiednim nagraniu gleby, w drugiej połowie kwietnia. Wysiew jęczmienia lub owsa, jako rośliny ochronnej dla mieszanki, wykonuje się w terminie nieco późniejszym od optymalnego dla jęczmienia na ziarno lub owsa na kiszonkę. Siew mieszanek w terminie wiosennym sprzyja dobremu rozwojowi systemu korzeniowego. Siew letni bez rośliny ochronnej powinien być stosowany tylko w wyjątkowych sytuacjach.

W uprawie mieszanek z rośliną ochronną stosuje się siew rozłączny – najpierw roślina ochronna, a zaraz po niej mieszanka. Masa wysiewu zbóż powinna być mniejsza niż w siewie czystym i wynosić: jęczmień jary – 100–120 kg · ha<sup>-1</sup>, owies – 120–140 kg · ha<sup>-1</sup>, a rozstawa rzędów i głębokość siewu typowe dla danego gatunku. Rośliny bobowe wysiewa się najczęściej w poprzek siewu rośliny ochronnej w rzędy o rozstawie 10–15 cm na głębokość do 2 cm na glebach lekkich i do 1 cm na glebach zwięzłych i wilgotnych [97, 98]. W optymalnych warunkach siedliskowych udział komponentów w mieszankach koniczyny łąkowej lub lucerny z tymotką łąkową powinien wynosić po 50% nasion z ich siewu czystego. Proporcje wysiewu komponentów mieszanek mogą zmieniać się jednak w zależności od warunków glebowych oraz klimatycznych. W warunkach bardziej suchych wskazane jest zwiększenie udziału rośliny bobowej w mieszance do 75%, natomiast w warunkach wilgotniejszych bardziej korzystny będzie większy wysiew traw, a mniejszy rośliny bobowej. Ze względu na podobną wielkość nasion mieszanki wysiewa się najczęściej po wcześniejszym zmieszaniu nasion obu komponentów.

W roku siewu plantacje mieszanek zakładane z rośliną ochronną w zasadzie nie wymagają stosowania żadnych zabiegów pielęgnacyjnych. W przypadku silnego zachwaszczenia łąnu należy przeprowadzić chemiczną ochronę plantacji, dostosowując herbicydy do rośliny ochronnej i komponentów mieszanki. W uprawie mieszanek bez rośliny ochronnej skutecznym zabezpieczeniem przed zachwaszczeniem gatunkami dwuliściennymi jest podkaszanie roślin na wysokość 10–15 cm, co skutecznie eliminuje chwasty jednoroczne [97, 98].

W latach pełnego użytkowania mieszanek koniczyny łąkowej lub lucerny z trawami nawożenie fosforem i potasem powinno być ustalane w oparciu o zasobność gleby w przyswajalne formy tych składników oraz oczekiwane plony. Mieszanki lucerny z trawami dają większe plony świeżej i suchej masy niż mieszanki z koniczyną łąkową, co powoduje pobranie większych ilości składników pokarmowych z gleby. Dlatego mieszanki lucerny z trawami nawozi się większymi dawkami nawozów fosforowych i potasowych. Nawożenie fosforem mieszanek koniczyny łąkowej lub lucerny siewnej z trawami można wykonać jednorazowo na 2 lata użytkowania. Fosfor wymywany jest wolno z gleby, dlatego możliwe jest nawożenie „na zapas” w pełnej dawce. W pierwszym i drugim roku użytkowania mieszanki koniczyny łąkowej z trawami w warunkach średniej zasobności gleby w ten składnik coroczna dawka fosforu powinna wynosić  $70 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Dawka potasu na glebach średnio zasobnych w ten składnik wynosi  $90 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$  i powinna być stosowana w dwóch terminach w proporcji 1:1 (wczesną wiosną oraz po zbiorze pierwszego pokosu). Nawożenie fosforowo-potasowe mieszanek lucerny siewnej z trawami na glebach średnio zasobnych w te składniki stosuje się w dawce  $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5$  i  $100 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Wiosną po zastosowaniu nawozów uzasadnione jest bronowanie, które przemiesza nawozy z glebą i przewietrzy wierzchnią warstwę gleby w międzyrzędziach [93].

Według Jadczyżyna i in. [147] nawożenie mieszanek lucerny z trawami przy średniej zasobności gleby w podstawowe składniki pokarmowe i plonie 30 t świeżej masy powinno wynosić: 40 kg N, 50 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 95 kg  $\text{K}_2\text{O}$  i 25 kg  $\text{MgO} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a dla plonu 50 t – 85 kg N, 80 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 155 kg  $\text{K}_2\text{O}$  i 40 kg  $\text{MgO} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Koniczyna łąkowa z trawami przy wydajności 30 t świeżej masy z 1 ha powinna być nawożona dawkami 40 kg N, 35 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 90 kg  $\text{K}_2\text{O}$  i 30 kg  $\text{MgO} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a przy plonie 50 t świeżej masy – 80 kg N, 60 kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ , 150 kg  $\text{K}_2\text{O}$  i 50 kg  $\text{MgO} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Azot w mieszankach koniczyny łąkowej lub lucerny z trawami stosuje się w dawkach dzielonych. Połowę dawki wysiewa się wiosną, a następnie po 25% dawki po zbiorze pierwszego i drugiego pokosu. Poziom nawożenia azotem mieszanek zależy od roku użytkowania i gatunku trawy w mieszance. W pierwszym roku użytkowania w łąnie mieszanek dominuje przeważnie roślina motylkowa i z tego względu należy stosować niższe dawki nawozów azotowych.

Wzrost udziału traw w mieszance w dalszych latach użytkowania wymusza zwiększenie dawki azotu. Jodełka i in. [160] oraz Sosnowski i Jankowski [310] podają, że wielkość plonu mieszanek traw z roślinami bobowymi nie zależy jedynie od ilości zastosowanych składników pokarmowych, ale również od warunków pogodowych, głównie średnich dobowych temperatur oraz wielkości i rozkładu opadów w okresie wegetacji.

Tymotka łąkowa charakteryzuje się mniejszym zapotrzebowaniem na azot, dlatego uprawiana w mieszance z roślinami bobowymi nie wymaga dawek większych niż  $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  w pierwszym roku użytkowania i  $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$  w kolejnych latach [93]. Najbardziej efektywne jest stosowanie azotu pod pierwszy pokos. W badaniach Nowaka i Sowińskiego [249] mieszanka koniczyny łąkowej z kupkówką pospolitą plonowała najwyższej, gdy dawkę azotu stosowano w trzech terminach: wczesną wiosną po ruszeniu wegetacji, po pierwszym i drugim pokosie. Wysokie dawki azotu powodują również zmniejszenie udziału rośliny bobowej w mieszance i wzrost udziału trawy.

Mieszanki lucerny z trawami można użytkować kośnie przez 3–4 lata po zasiewie, a rocznie można zebrać trzy lub cztery pokosy zielonki. W użytkowaniu intensywnym koszenie mieszanek z lucerną następuje w odstępach 30-dniowych i pozwala na zbiór czterech pokosów charakteryzujących się średnią wielkością plonu. Zbiór trzech pokosów w sezonie wegetacyjnym pozwala uzyskać najwyższe plony. Mieszanki koniczyny łąkowej z trawami najczęściej użytkuje się przez dwa lata, a rocznie mogą być zbierane dwa, trzy, a nawet cztery razy. W rejonach suchych i o krótkim okresie wegetacji największe plony suchej masy uzyskuje się z dwóch pokosów. W rejonach wilgotniejszych i o dłuższym okresie wegetacji uzyskuje się z trzech lub czterech pokosów plony o 20% większe [97].

### **3. Metodyka badań**

Podstawą opracowania są wyniki badań uzyskane w ramach tematu badawczego „Biomasa i biogaz z fermentacji roślin zielnych i wodnych” w zadaniu 1.1. „Zbadanie rolniczej wydajności, energetycznej sprawności i ekonomicznej efektywności produkcji fitomasy na cele energetyczne wybranych taksonów traw i roślin bobowatych (d. motylkowatych) oraz opracowanie technologii jej wytwarzania w konwencjonalnym i integrowanym systemie gospodarowania”. Pochodzą one z kilku źródeł: doświadczeń polowych łąkowych i ściśłych; pomiaru energochłonności w bezpośrednich procesach technologicznych produkcji biomasy na polach produkcyjnych stacji, przy użyciu techniki stosowanej w gospodarstwach wielkoobszarowych; badań laboratoryjnych; analiz sprawa-



wności energetycznej; analiz ekonomicznej efektywności produkcji biomasy; analiz statystycznych wybranych wyników.

### 3.1. Badania polowe i laboratoryjne

Zasadniczą część wyników interpretowanych w niniejszym opracowaniu uzyskano na polach doświadczalnych Zakładu Produkcyjno-Doświadczalnego w Bałcynach k. Ostródy (53°35'N, 19°51'E) należącego do Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Badania polowo-łanowe, dwuczynnikowe, przy użyciu technik i metod stosowanych w praktyce rolniczej realizowano na dużych polach (0,4 ha dla każdego gatunku), w dwóch powtórzeniach. W badaniach uwzględniono rośliny o typie fotosyntezy  $C_4$  (kukurydza zwyczajna, sorgo cukrowe, miskant olbrzymi, miskant cukrowy), które uprawiano według dwóch technologii – konwencjonalnej (intensywnej, wysokonakładowej, oznaczonej w tabelach jako K) i integrowanej (I) o zmniejszonych nakładach na środki produkcji w stosunku do K. Szczegółowe metody badań wysoko- i średnionakładowych technologii produkcji biomasy zamieszczono w tab. 3.1. Zlokalizowano je na glebie płowej, wytworzonej z pyłu lekkiego na glinie lekkiej, zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego (klasa bonitacyjna IIIb). Zawartość przyswajalnych składników pokarmowych w glebie wynosiła: 0,080 g  $P_2O_5$ , 0,078 g  $K_2O$ , 0,034 MgO g · kg<sup>-1</sup> gleby, a jej odczyn był lekko kwaśny (pH – 5,8 w 1 M<sub>KCL</sub>).

Tabela 3.1

Metody badań wysoko- i średnionakładowych technologii produkcji biomasy traw  $C_4$

Oct*	Technologia	
	Wysokonakładowa (K) (konwencjonalna)	Średnionakładowa (I) (integrowana)
1	2	3
<b>Kukurydza zwyczajna</b>		
Wybór stanowiska	Kukurydzę uprawiano po różnych przedplonach: w 2009 r. – burak cukrowy, w 2010 r. – rutwica wschodnia, w 2011 r. – sorgo cukrowe i w 2012 r. – lucerna siewna.	
Uprawa roli	Wykonano uproszczony zespół upraw późniowych (talerzowanie) oraz orkę przedzimową na średnią głębokość. Wiosenna, przedsiewna uprawa sprowadzała się do płytkiego spulchniania gleby i wyrównania powierzchni pola za pomocą agregatu biernego na bazie kultywatora i wału strunowego.	
Dobór odmian	W 2009 r. – LG 3255 (FAO 260), w 2010 r. – LG 3252 (FAO 250), w 2011 i 2012 r. – Touran (FAO 230)	W latach 2009–2010 – LG 3255 (FAO 260), w latach 2011–2012 – LG 3252 (FAO 250).
	Powyższe odmiany charakteryzuje wysoki plon suchej masy z dużym udziałem kolb, wysoka zawartość skrobi oraz wysoka strawność roślin (LOO 2009, 2010)	

cd. tabeli 3.1

1	2	3
Nawożenie mineralne	Zastosowano przedsięwzięcie 120 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 140 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem roli agregatem uprawowym. Azot stosowano w dwóch dawkach – 120 kg N przed siewem i 60 kg N · ha <sup>-1</sup> w fazie 6 liści.	Zastosowano przedsięwzięcie 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 100 kg K <sub>2</sub> O oraz 120 kg N · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem roli agregatem uprawowym.
	Fosfor aplikowano w formie fosforanu amonu (46% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – fosforanu amonu (18% NH <sub>4</sub> ) oraz saletry amonowej (34% NH <sub>4</sub> i NO <sub>3</sub> ).	
Siew	Zaprawiony (zaprawa dedykowana przez producenta nasion) materiał siewny kukurydzy wysiewano punktowo w rzędy co 75 cm, umieszczając 12 ziarniaków kiełkujących na 1 m <sup>2</sup> (około 36 kg · ha <sup>-1</sup> ) na głębokość 6 cm. Termin siewu w latach badań – 2 i 3 dekada kwietnia.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	Stosowano wyłącznie pielęgnację chemiczną poniżej wyszczególnionymi herbicydami: w 2009 r. jeden zabieg przedwiosnowo – Trophy 768 EC w dawce 2,0 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. acetochlor, dichlormid) – na chwasty jedno- i dwuliścienne. W 2010 r. jeden zabieg przedwiosnowo – Guardian 840 EC w dawce 2,5 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. acetochlor) – na chwasty jedno- i dwuliścienne. W 2011 r. jeden zabieg przedwiosnowo – Lumax 537,5 SE w dawce 3,5 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. terbutyloazyna, meztotriol, S-metolachlor) – na chwasty jedno- i dwuliścienne. W 2012 r. dwa zabiegi: przedwiosnowo – Gallup 360 SL w dawce 5,0 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. glifosat) – o działaniu totalnym oraz przedwiosnowo – Lumax 537,5 SE w dawce 3,5 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. terbutyloazyna, meztotriol, S-metolachlor) – na chwasty jedno- i dwuliścienne.	
Zbiór biomasy	Sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, w stadium wyznaczonym zawartością 34% suchej masy. Rośliny koszone nisko (~20 cm), rozdrabniając je na odcinki długości ~10 mm.	
<b>Sorgo cukrowe</b>		
Wybór stanowiska	Sorgo uprawiano po różnych przedplonach. W 2009 r. – burak cukrowy, w 2010 r. – rutwica wschodnia, w 2011 r. – kukurydza zwyczajna i w 2012 r. – lucerna siewna.	
Uprawa roli	Uprawa roli była analogiczna jak pod kukurydzę.	
Dobór odmian	W latach 2009–2012 – Sucrosorgo 506	W 2009 r. – Sucrosorgo 506, w latach 2010–2012 – Rona 1
	Powyższe odmiany charakteryzuje wysoki potencjał produkcyjny zielonej masy, bardzo wysoka tolerancja na suszę, bardzo dobra odporność na wyleganie, wysoka zawartość cukru w roślinie. Ponadto rośliny odmiany Rona 1 zawierają bardzo niski poziom ligniny.	
Nawożenie mineralne	Zastosowano przedsięwzięcie 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 160 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym. Azot stosowano w dwóch dawkach – 100 kg N przed siewem i 60 kg N · ha <sup>-1</sup> w fazie 6 liści.	Zastosowano przedsięwzięcie 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 100 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> oraz 100 N · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym.
	Fosfor aplikowano w formie fosforanu amonu (46% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – fosforanu amonu (18% NH <sub>4</sub> ) oraz saletry amonowej (34% NH <sub>4</sub> i NO <sub>3</sub> ).	

cd. tabeli 3.1

1	2	3
Siew	Zaprawiony (zaprawa dedykowana przez producenta nasion) materiał siewny sorga wysiewano punktowo (siewnikiem z tarczami wysiewającymi o otworach 2–3 mm), w rzędy co 75 cm, umieszczając 24 ziarniaki kiełkujące na 1 m <sup>2</sup> (około 6–8 kg · ha <sup>-1</sup> ). Głębokość siewu wynosiła 2,5–3 cm. Termin siewu w latach badań – 2 i 3 dekada maja.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	Stosowano wyłącznie pielęgnację chemiczną, poniżej wyszczególnionymi herbicydami: w 2009 r. jeden zabieg przedwschodowo – Chwastox Extra 300 SL w dawce 3,0 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. MCPA) – na chwasty jedno- i dwuliścienne. W latach 2010–2011 jeden zabieg przedwschodowo – Lumax 537,5 SE w dawce 2,5 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. terbutyloazyna, mezo-trion, S-metolachlor) – na chwasty jedno- i dwuliścienne. W 2012 r. dwa zabiegi: przedsiewnie – Gallup 360 SL w dawce 5,0 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. glifosat) – o działaniu totalnym oraz przedwschodowo – Lumax 537,5 SE w dawce 3,5 l · ha <sup>-1</sup> (s.a. terbutyloazyna, mezo-trion, S-metolachlor) – na chwasty jedno- i dwuliścienne.	W 2009 r. stosowano mechaniczną regulację zachwaszczenia – pielenie międzyrzędzi. W latach 2010–2012 chemiczną pielęgnacją odchwaszczającą – analogicznie jak w technologii wysokonakładowej.
Zbiór biomasy	Sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, w stadium wyznaczonym zawartością >25% suchej masy. Rośliny koszone nisko (~20 cm), rozdrabniając je na odcinki długości ~10 mm	
<b>Miskant olbrzymi</b>		
Wybór stanowiska	Plantacje miskanta olbrzymiego założono w stanowisku po buraku cukrowym.	
Dobór odmian	Materiał rozmnożeniowy miskanta stanowiły wegetatywne sadzonki kłączowe (rhizomy). Pozyskano je (dzień przed sadzeniem) z plantacji matecznej znajdującej się w województwie pomorskim ( <a href="http://www.miskantolbrzymi.pl">www.miskantolbrzymi.pl</a> ).	
Założenie plantacji	Wykonano uproszczony zespół upraw późniowych (talerzowanie) oraz orkę przedzimową na średnią głębokość. Wiosenna uprawa roli polegała na głębokim spulchnieniu gleby (~10 cm) i wyrównaniu powierzchni pola agregatem biernym na bazie kultywatora i wału strunowego. Sadzenie wykonano ręcznie w rzędach co 70 cm, a sadzonki (długości ~10 cm) umieszczano w rzędzie (co 70 cm) „pod łopatę” na głębokość ~7 cm. Pozwoliło to na uzyskanie obsady 2 sztuk na 1 m <sup>2</sup> .	
Nawożenie mineralne	W roku założenia plantacji zastosowano: 90 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed sadzeniem.	W roku założenia plantacji zastosowano: 60 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed sadzeniem.
	W latach użytkowania plantacji dawki nawozów mineralnych wynosiły: 120 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> .	W latach użytkowania plantacji dawki nawozów mineralnych wynosiły: 90 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> .
Fosfor aplikowano w formie fosforanu amonu (46% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – fosforanu amonu (18% NH <sub>4</sub> ) oraz saletry amonowej (34% NH <sub>4</sub> i NO <sub>3</sub> ).		

cd. tabeli 3.1

1	2	3
Pielęgnacja odchwaszczająca	W 2009 r. zachwaszczenie regulowano metodą chemiczno-mechaniczną: stosowano jeden zabieg herbicydowy – Chwastox Turbo 340 SL w dawce $2,5 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. MCPA, dikamba) – na chwasty jedno- i dwuliścienne oraz dwukrotne pelenie międzyrzędzi.	W 2009 r. zastosowano mechaniczną regulację zachwaszczenia – wykonano dwukrotne pelenie międzyrzędzi.
	W 2010 r. jeden zabieg nalistny: Granstar Ultra SX 50 SG w dawce $60 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. tifensulfuron, tribenuron metyloowy) – na chwasty dwuliścienne oraz Atlantis 12OD w dawce $0,35 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. jodosulfuron metylosodowy, mezosulfuron metyloowy) – na chwasty jednoliścienne łącznie z adiuwantem Actirob 842 EC w dawce $1,0 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ . W latach 2011–2012 plantację odchwaszczano chemicznie mieszaniną Granstar Ultra SX 50 SG w dawce $60 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. tifensulfuron, tribenuron metyloowy) – na chwasty dwuliścienne oraz Starane 250 EC w dawce $0,3 \text{ l} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. fluoksypyr) – na chwasty dwuliścienne.	
Zbiór biomasy	Zbioru dokonano w tym samym terminie co kukurydzy, stosując tę samą technologię.	
<b>Miskant cukrowy</b>		
Wybór stanowiska	Analogicznie jak w technologii konwencjonalnej miskanta olbrzymiego	Analogicznie jak w technologii integrowanej miskanta olbrzymiego
Uprawa roli		
Założenie plantacji		
Dobór odmian		
Nawożenie mineralne		
Pielęgnacja odchwaszczająca	W latach 2009–2010 stosowano te same herbicydy jak w technologii konwencjonalnej miskanta olbrzymiego. W 2011 r. nie stosowano żadnej regulacji zachwaszczenia, natomiast w 2012 r. pielęgnację odchwaszczającą wykonano przy użyciu Granstar Ultra SX 50 SG w dawce $60 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ (s.a. tifensulfuron, tribenuron metyloowy) – na chwasty dwuliścienne.	
Zbiór biomasy	Zbioru dokonano w tym samym terminie co kukurydzy, stosując tę samą technologię.	

Oct\* – Operacje i czynności technologiczne.

Doświadczenie polowe ściśle, dwuczynnikowe prowadzono w układzie losowanych podbloków w dwóch powtórzeniach. W badaniach uwzględniono trawy  $C_3$  (kupkówka pospolita, tymotka łąkowa), wieloletnie rośliny bobowe (lucerna siewna, rutwica wschodnia) i mieszanki bobowych z trawami (lucerna siewna z tymotką łąkową, koniczyna łąkowa z tymotką łąkową), które uprawiano według dwóch technologii – konwencjonalnej (intensywnej, wysokonakłado-

wej, oznaczonej w tabelach jako K) i integrowanej (I) – o zmniejszonych nakładach na środki produkcji w stosunku do K. Badania z roślinami bobowymi drobnonasiennymi, trawami typu C<sub>3</sub> i mieszankami bobowo-trawiastymi prowadzono na małych polach (210 m<sup>2</sup> dla każdego gatunku). Eksperyment założono na glebie płowej o składzie granulometrycznym piasku gliniastego mocnego (61% piasku, 20% pyłu i 19% części spławianych, a udział części szkieletowych wynosił 2,6%), zaliczanej do klasy bonitacyjnej IIIa i 4 kompleksu przydatności rolniczej (żytni bardzo dobry). Poziomi próchniczy gleby miał odczyn lekko kwaśny (pH – 5,5 w 1 M<sub>KCl</sub>), zaś kwasowość hydrolytyczna wynosiła 1,67. Zasobność gleby w przyswajalne składniki pokarmowe to: 0,085 g P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,085 g K<sub>2</sub>O, 0,037 g MgO · kg<sup>-1</sup>. Szczegółowe metody badań wysoko- i średnionakładowych technologii produkcji biomasy przedstawia tabela 3.2.

Tabela 3.2  
Metody badań wysoko- i średnionakładowych technologii produkcji biomasy traw C<sub>3</sub>, roślin bobowych i ich mieszanek z trawami

Oct*	Technologia	
	Wysokonakładowa (K) (konwencjonalna)	Średnionakładowa (I) (integrowana)
1	2	3
<b>Lucerna siewna</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Po zbiorze przedplonu pole bronowano, a późną jesienią wykonano orkę przedzimową na głębokość 30 cm. Wiosenna uprawa sprowadzała się do wyrównania powierzchni pola za pomocą brony oraz uprawy przedsewnej przy użyciu agregatu uprawowego złożonego z kultywatora i wału strunowego.	
Dobór odmian	Verko	
	Odmiana o dobrej zimotrwałości, szybko odrasta wiosną i po kolejnych pokosach, średnio odporna na wyleganie. Dobrze toleruje okresy suszy i posiada znaczną odporność na choroby uwiądowe.	
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji: 30 kg N, 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 100 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym. W latach pełnego użytkowania: 100 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 140 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . Fosfor i 1/3 dawki potasu stosowano po ruszeniu wegetacji, a pozostałą dawkę potasu w dwóch równych częściach po pierwszym i drugim pokosie.	W roku zakładania plantacji (potrzeby nawozowe lucerny i rośliny ochronnej): 60 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym. W latach pełnego użytkowania: 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 100 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . Fosfor i 1/3 dawki potasu stosowano po ruszeniu wegetacji, a pozostałą dawkę potasu w dwóch równych częściach po pierwszym i drugim pokosie.
	Fosfor aplikowano w formie superfosfatu wzbogaconego (40% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – saletry amonowej (34% N). W roku założenia doświadczenia po zbiorze przedplonu stosowano nawóz wapniowo-magnezowy w dawce 3,0 t · ha <sup>-1</sup> .	

cd. tabeli 3.2

1	2	3
Siew	Wczesnowiosenny, bez rośliny ochronnej. Zaprawiony materiał siewny (zaprawa dedykowana przez producenta nasion + nitragina) wysiewano w rzędy co 11 cm, masa wysiewu – 10 kg · ha <sup>-1</sup> , głębokość siewu – 1,5 cm. Po siewie wykonywano wałowanie posiewne wałem gładkim.	Wczesnowiosenny, rozłączny w roślinę ochronną (owies na biomase). Kwalifikowany materiał siewny owsa (130 kg · ha <sup>-1</sup> ) zaprawiony zaprawą dedykowaną przez producenta wysiewano w rzędy co 11 cm, na głębokość 4 cm. Zaprawiony materiał siewny lucerny (zaprawa dedykowana przez producenta nasion + nitragina) wysiewano w rzędy co 15 cm. Masa wysiewu – 15 kg · ha <sup>-1</sup> , głębokość siewu – 1,5 cm. Po siewie wykonywano wałowanie posiewne wałem gładkim.
Pielęgnacja odchwaszczająca	W roku zakładania plantacji stosowano wyłącznie pielęgnację chemiczną – Basagran 480 SL (s.a. bentazon) w dawce 2,0 l · ha <sup>-1</sup> – na chwasty dwuliścienne w fazie 3 liści trójdzielnych lucerny.	W roku zakładania plantacji stosowano mechaniczną regulację zachwaszczenia – przykaszanie chwastów.
	W latach pełnego użytkowania wykonywano wiosenne bronowanie plantacji po wysiewie nawozów mineralnych.	
Zbiór biomasy	W latach pełnego użytkowania zbierano 3 pokosy biomasy: pierwszy w fazie pąkowania, drugi – w fazie kwitnienia, trzeci – ostatnia dekada września.	
<b>Rutwica wschodnia</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Analogiczna jak pod lucernę siewną.	
Dobór odmian	Risa Jedyna polska odmiana rutwicy wschodniej wpisana do Księgi Wyłącznego Prawa do Odmiany. Od 2010 roku prowadzone są badania rejestrowe.	
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji: 30 kg N, 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 90 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym. W latach pełnego użytkowania: 90 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> stosowane w całości po ruszeniu vegetacji.	W roku zakładania plantacji: 30 kg N, 40 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 60 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprawieniem gleby agregatem uprawowym. W latach pełnego użytkowania: 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 90 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> stosowane w całości po ruszeniu vegetacji.
	Fosfor aplikowano w formie superfosfatu wzbogaconego (40% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – saletry amonowej (34% N). W roku założenia doświadczenia po zbiorze przedplonu stosowano nawóz wapniowo-magnezowy w dawce 3,0 t · ha <sup>-1</sup> .	
Siew	Wiosenny, bez rośliny ochronnej. Materiał siewny zaprawiony zaprawą nasienną Sarfun T 65 DS (s.a. karbendazym, tiuram). Masa wysiewu – 15 kg · ha <sup>-1</sup> . Przed siewem materiał siewny wymieszany z 15 kg gleby zawierającej bakterie brodawkowe <i>Rhizobium galegae</i> . Rozstawa rzędów – 20 cm, głębokość siewu – 1,5 cm. Po siewie wykonano wałowanie posiewne wałem gładkim.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	Analogiczna jak u lucerny siewnej.	Analogiczna jak u lucerny siewnej.

cd. tabeli 3.2

1	2	3
Zbiór biomasy	W latach pełnego użytkowania zbierano 3 pokosy biomasy: pierwszy pokos – początek kwitnienia, drugi – początek kwitnienia, trzeci – ostatnia dekada września.	
<b>Tymotka łąkowa</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Po zbiorze przedplonu pole bronowano, a późną jesienią wykonano orkę przedzimową na głębokość 30 cm. Wiosenna uprawa sprowadzała się do wyrównania powierzchni pola za pomocą brony oraz uprawy przedsewnej przy użyciu agregatu uprawowego złożonego z kultywatora i wału strunowego.	
Dobór odmian	Climax	
	Odmianę charakteryzuje wysoka produktywność biomasy oraz bardzo dobra zimotrwałość.	
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji: 60 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprowadzeniem gleby agregatem uprawowym + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym i drugim pokosie. W latach pełnego użytkowania: 60 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> – wczesną wiosną + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym i drugim pokosie.	W roku zakładania plantacji: 30 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed doprowadzeniem gleby agregatem uprawowym + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym i drugim pokosie. W latach pełnego użytkowania: 30 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> – wczesną wiosną + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym i drugim pokosie.
	Fosfor aplikowano w formie superfosfatu wzbogaconego (40% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – saletry amonowej (34% N).	
Siew	Wczesnowiosenny, bez rośliny ochronnej. Masa wysiewu – 10 kg · ha <sup>-1</sup> , rozstawa rzędów – 10 cm, głębokość siewu – 1–2 cm. Po siewie wykonano wałowanie posiewne wałem gładkim.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	W roku zakładania plantacji stosowano wyłącznie pielęgnację chemiczną – Chwastox Extra 300 SL (s.a. MCPA) w dawce 2,0 l · ha <sup>-1</sup> – na chwasty dwuliścienne, w fazie krzewienia.	W roku zakładania plantacji stosowano mechaniczną regulację zachwaszczenia – przykaszanie chwastów.
Zbiór biomasy	W latach 2009–2010 zbierano 3 pokosy biomasy: pierwszy i drugi – w fazie kłoszenia, trzeci – pierwsza dekada października. W latach 2011–2012 zbierano 2 pokosy biomasy w fazie kłoszenia.	
<b>Kupkówka pospolita</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Analogiczna jak pod tymotkę łąkową.	
Dobór odmian	Amba	
	Odmiana charakteryzuje się dobrą zimotrwałością, intensywnym wzrostem wiosennym i dobrą energią odrastania.	
Nawożenie mineralne	Analogiczne jak u tymotki łąkowej.	Analogiczne jak u tymotki łąkowej.
Siew	Wczesnowiosenny, bez rośliny ochronnej. Masa wysiewu – 25 kg · ha <sup>-1</sup> , rozstawa rzędów – 10 cm, głębokość siewu – 1–2 cm. Po siewie wykonano wałowanie posiewne wałem gładkim.	

cd. tabeli 3.2

1	2	3
Pielęgnacja odchwaszczająca	Analogiczna jak u tymotki łąkowej.	Analogiczna jak u tymotki łąkowej.
Zbiór roślin	W latach 2009 i 2012 zbierano 3 pokosy biomasy: pierwszy i drugi – w fazie kłoszenia, trzeci – pierwsza dekada października. W latach 2010–2011 zbierano 2 pokosy fitomasy w fazie kłoszenia.	
<b>Lucerna siewna + tymotka łąkowa</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Po zbiorze przedplonu pole bronowano, późną jesienią wykonano orkę przedzimową na głębokość 30 cm. Wiosenna uprawa sprowadzała się do wyrównania powierzchni pola za pomocą brony oraz uprawy przedsiewnej przy użyciu agregatu uprawowego złożonego z kultywatora i wału strunowego.	
Dobór odmian	Lucerna siewna odmiana Verko + tymotka łąkowa odmiana Climax.	
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji: 60 kg N, 90 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed zastosowaniem agregatu uprawowego + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym pokosie. W latach pełnego użytkowania: 60 kg N, 90 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> – wczesną wiosną + 60 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym pokosie.	W roku zakładania plantacji: 40 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> przed zastosowaniem agregatu uprawowego + 30 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym pokosie. W latach pełnego użytkowania: 40 kg N, 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> oraz 90 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> – wczesną wiosną + 40 kg N · ha <sup>-1</sup> po pierwszym pokosie.
	Fosfor aplikowano w formie superfosfatu wzbogaconego (40% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ), potas – soli potasowej (60% K <sub>2</sub> O), azot – saletry amonowej (34% N).	
Siew	Wczesnowiosenny, łączny, bez rośliny ochronnej. Masa wysiewu: lucerna siewna – 10 kg · ha <sup>-1</sup> , tymotka łąkowa – 5 kg · ha <sup>-1</sup> . Rozstawa rzędów – 10 cm, głębokość siewu – 1–2 cm. Po siewie wykonano walowanie posiewne wałem gładkim.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	Stosowano wyłącznie pielęgnację chemiczną w roku zakładania plantacji: Basagran 480 SL (s.a. bentazon) w dawce 2,0 l · ha <sup>-1</sup> – na chwasty dwuliścienne w fazie 3 liści trójdzielnych lucerny.	Stosowano mechaniczną regulację zachwaszczenia w roku zakładania plantacji – przykaszanie chwastów.
	W latach pełnego użytkowania wykonywano wiosenne bronowanie plantacji po wysiewie nawozów mineralnych.	
Zbiór biomasy	W latach pełnego użytkowania zbierano 3 pokosy biomasy: pierwszy pokos – w fazie kłoszenia tymotki, drugi i trzeci – w fazie kwitnienia lucerny.	
<b>Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa</b>		
Wybór stanowiska	Przedplon – ziemniak uprawiany na oborniku.	
Uprawa roli	Analogiczna jak u mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.	
Dobór odmian	Koniczyna łąkowa odmiana Nike + tymotka łąkowa odmiana Climax.	
Nawożenie mineralne	Analogiczne jak u mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.	Analogiczne jak u mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.



cd. tabeli 3.2

1	2	3
Siew	Wczesnowiosenny, łączny, bez rośliny ochronnej. Masa wysiewu: koniczyna łąkowa – 7,5 kg · ha <sup>-1</sup> , tymotka łąkowa – 5 kg · ha <sup>-1</sup> . Rozstawa rzędów – 10 cm, głębokość siewu – 1–2 cm. Po siewie wykonywano wałowanie posiewne wałem gładkim.	
Pielęgnacja odchwaszczająca	Analogiczna jak u mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.	Analogiczna jak u mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.
Zbiór biomasy	W latach pełnego użytkowania zbierano 3 pokosy biomasy. Pierwszy pokos w fazie kłoszenia tymotki, drugi i trzeci – w fazie kwitnienia koniczyny łąkowej.	

Oct\* – Operacje i czynności technologiczne.

Po zbiorze fitomasy z doświadczeń polowych ściśłych i łąkowych określono plon świeżej masy, a po dosuszeniu w suszarni w temperaturze 105°C do stałej masy – plon powietrznie suchej masy. Bezpośrednio po skoszeniu pocięty surowiec zakiszano w 100-litrowych, plastikowych, zamkniętych pojemnikach wyłożonych folią. W celu lepszej sprawności procesu kiszenia partie biomasy były spryskiwane kwasem mrówkowym lub propionowym w ilości 5 ml · kg<sup>-1</sup>. Następnie, po uprzednim wyciśnięciu powietrza, zawiązywano worek foliowy, przygniatano go obciążnikiem i zakręcano pojemnik.

Badania dotyczące wydajności biogazu i zawartego w nim metanu oraz pomiar parametrów fizycznych i chemicznych wykonano w latach 2010 i 2011. W roku 2010 zostały przeprowadzone w laboratorium biotechnologicznym firmy Biogaz Zeneris Sp. z o.o [282]. W analizie biogazodochodowości do pomiaru suchej masy oraz suchej masy organicznej wykorzystano metody grawimetryczne wg norm PN-EN 12880 i PN-EN 12879, w analizie składu biogazu – analizator firmy Geotechnical Inst. – typ GA 2000 Plus oraz GAS DATA GFM 410 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>) oraz chromatograf VARIAN Micro GC-4900 (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>). W roku 2011 badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Inżynierii Ochrony Środowiska, Wydział Nauk o Środowisku Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie [283]. Badania te obejmowały kolejno:

1. Mechaniczne rozdrobnienie substratów do średnicy 2–3 mm za pomocą młynka ROBO 3000.

2. Określenie (metodą grawimetryczną) wilgotności oraz zawartości suchej masy, popiołu oraz suchej masy organicznej.

3. Określenie w powstałym substracie odczynu (pH), zawartości suchej masy, suchej masy organicznej, zawartości węgla całkowitego TC (*Total Carbon*), węgla organicznego TOC (*Total Organic Carbon*) oraz azotu całkowitego TN (*Total Nitrogen*). Do analizy wykorzystano analizator cząstek elementarnych Fless 2000 firmy Thermo. Dodatkowo oznaczono ogólne stężenie cukrów redukujących metodą z odczynnikiem DNS.

4. Pomiary respirometryczne przeprowadzono za pomocą zestawów Oxi Top firmy WTW, a po 40-dniowym czasie pomiaru osad pofermentacyjny poddano analogicznym analizom jak przed rozpoczęciem procesu. Pomiar obejmował umieszczenie w komorze reakcyjnej ( $V=500$  ml) standaryzowanej we wszystkich pomiarach porcji beztlenowego osadu czynnego (200 ml) oraz odpowiedniej ilości rozdrobnionej kisonki. Przed uruchomieniem urządzenia rejestrującego całość mieszano przy utrzymaniu warunków beztlenowych i wyrównanej temperatury we wszystkich komorach reakcyjnych. Następnie rejestrowano ciśnienia wewnątrz komory oraz rozkład beztlenowych związków organicznych prowadzących do powstawania gazu fermentacyjnego (głównie  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}_2$ ). Zestaw pomiarowy składający się z komory reakcyjnej oraz urządzenia pomiarowo-rejestrującego umieszczono w szafie termostatującej o histerezie nie przekraczającej około  $0,2^\circ\text{C}$ . Pomiary prowadzono przy temperaturze  $35^\circ\text{C}$  przez 40–41 dni. Wartości ciśnienia w komorze reakcyjnej były odczytywane i rejestrowane co 160 minut.

5. Po zakończeniu pomiaru respirometrycznego przeprowadzono analizę powstałego biogazu, określano jego skład i zawartość procentową za pomocą chromatografu gazowego GC Agilent 7890 A. Dodatkowo przeprowadzono analizę jakości powstałego biogazu za pomocą analizatora GMF 430 firmy Gas Data. Określono procentową zawartość metanu ( $\text{CH}_4$ ), ditlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), tlenu ( $\text{O}_2$ ), wodoru ( $\text{H}_2$ ), siarkowodoru ( $\text{H}_2\text{S}$ ) i amoniaku ( $\text{NH}_3$ ).

### **3.2. Analiza energetyczna**

Nakłady energii skumulowanej ponoszone na produkcję biomasy określono metodą analizy procesów według własnych, bezpośrednich pomiarów zużycia oleju napędowego, nakładów pracy i rzeczywistej wydajności maszyn na polach produkcyjnych Zakładu Produkcyjno-Doświadczalnego w Bałcynach z wykorzystaniem maszyn i narzędzi stosowanych w rolnictwie wielkoobszarowym: JD8100 + Kverneland BB100 (orka), JD8100 + KP600 (uprawa przedsiewna), JD5720 + Amazone ZA-M 2000 (nawożenie mineralne), JD8320 + Vaderstad Rapid (siew klasyczny), U904 + KONGSKLIDE Demeter Variosem VM4 (siew punktowy), U1614 + Vaderstad Rolex 600 (wałowanie), C-360 + Wielorak (pielęgnacja mechaniczna), JD6620 + Krukowiak Goliat 3000 (ochrona chemiczna), Fortschritt E 303 + JD6620 + Kverneland Taarup 9472C + Vicon RV 1602 (zestaw do zbioru zielonki rutwicy wschodniej, lucerny siewnej, tymotki łąkowej, kupkówki pospolitej i mieszanek motylkowato-trawiastych), C-360 + Sipma Ariadna Z-281 (owijanie bel cylindrycznych), JD7200 + T088 + JD6620 (zestaw do zbioru biomasy kukurydzy zwyczajnej, sorga cukrowego, miskanta olbrzymiego i miskanta cukrowego).

Tabela 3.3  
Wskaźniki energii skumulowanej przyjęte do wyliczeń nakładów energetycznych

Materiały i środki	Jednostka miary	Wartość energetyczna [MJ]	Źródło
Azot (N)	kg	77,0	[365]
Fosfor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	kg	15,0	
Potas (K <sub>2</sub> O)	kg	10,0	
Wapń (Ca)	kg	6,0	
Olej napędowy	l	48,0	
Substancja aktywna środka ochrony roślin	kg	300,0	
Praca ludzka	rbh	40,0	[258]
Biometan	m <sup>3</sup>	35,7	[171, 268]
Kiszonka lucerny siewnej	kg	17,6	analizy własne
Kiszonka rutwicy wschodniej	kg	17,8	
Kiszonka kupkówki pospolitej	kg	18,2	
Kiszonka tymotki łąkowej	kg	18,2	
Kiszonka lucerny siewnej i tymotki łąkowej	kg	18,0	
Kiszonka koniczyny łąkowej i tymotki łąkowej	kg	18,1	
Kiszonka kukurydzy zwyczajnej	kg	18,2	
Kiszonka sorga cukrowego	kg	17,7	
Kiszonka miskanta olbrzymiego	kg	18,5	
Kiszonka miskanta cukrowego	kg	18,4	

W analizie energochłonności procesów produkcji pierwotnej uwzględniono 4 strumienie nakładów energii: praca ludzka, ciągniki i maszyny, nośniki energii i materiały (nasiona, nawozy, środki ochrony roślin). Zużycie paliwa określono metodą pełnego zbiornika, czas pracy ludzi i maszyn nie uwzględniał czasu dojazdu na pole. Nakłady energetyczne zastosowania w procesie produkcyjnym ciągników i maszyn wyliczono, mnożąc jednostkową materiałochłonność zestawu przez energetyczny ekwiwalent wynoszący 112 MJ · kg<sup>-1</sup> masy [258].

Wielkość nakładów energetycznych poniesionych na materiały obliczono na podstawie ich rzeczywistego zużycia oraz wskaźników energii skumulowanej przedstawionych w tabeli 3.3. Wartość energetyczną 1 kg biomasy (tab. 3.3) określono według Polskiej Normy (PN-ISO9831) [272] oznaczania wartości energetycznej brutto – metoda bomby kalorymetrycznej (Indeks analiz chemicznych AOAC).

W energetycznej ocenie technologii uprawy posłużono się następującymi kategoriami:

- zysk energii skumulowanej ( $Z_k$ ), będący różnicą między wartością energetyczną plonu ( $P_e$ ) a sumą nakładów na jego uzyskanie ( $N_e$ ):

$$Z_k = P_e - N_e \text{ (MJ} \cdot \text{ha}^{-1}\text{)}$$

- wskaźnik energochłonności jednostkowej w przeliczeniu na 1 kg plonu ( $E_j$ ), będący stosunkiem sumy nakładów energii ( $N_e$ ) do masy plonu ( $M_p$ ):

$$E_j = N_e/M_p$$

- wskaźnik efektywności (sprawności) energetycznej ( $E_e$ ) będący stosunkiem sumy ekwiwalentu energetycznego zawartego w plonie biomasy ( $P_e$ ) do sumy wszystkich nakładów energetycznych ( $N_e$ ):

$$E_e = P_e/N_e$$

Dodatkowo obliczono drugi wskaźnik energetycznej efektywności produkcji w oparciu o uzyskany w badaniach plon biogazu [171, 268]. W obliczeniach wydajności biogazu i metanu z jednostki powierzchni punktem wyjścia była świeża masa kiszonki.

### 3.3. Analiza ekonomiczna

W obliczeniach kosztów poniesionych na uprawę 1 ha roślin energetycznych zastosowano model stosowany w ocenie gospodarstw polskiego FADN (Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej – Państwowy Instytut Badawczy) za Gorajem i Mańko [107]. Do kosztów produkcji zaliczono koszty bezpośrednie (nasiona własne lub z zakupu, nawozy mineralne, środki ochrony roślin i inne koszty bezpośrednie produkcji biomasy) oraz pośrednie (koszty ogólnogospodarcze, amortyzację, koszt czynników zewnętrznych). Składowe koszty bezpośrednich obliczono na podstawie średnich rocznych cen środków produkcji i płodów rolnych w danym roku badań. Koszty pracy maszyn obliczono, biorąc pod uwagę rzeczywiste ich wykorzystanie na polach Zakładu Produkcyjno-Doświadczalnego „Bałcyny” w Bałcynach. Jednostkowe koszty eksploatacyjne ciągników i maszyn obliczono natomiast na podstawie modelu IBMER [102, 240]. Koszt pracy ludzkiej określono według uśrednionej stawki obowiązującej w ZPD „Bałcyny”. Analiza ekonomiczna ma charakter kalkulacji uproszczonej. W badaniach własnych nie uwzględniono kosztów czynników własnych oraz płatności – Jednolita Płatność Obszarowa (JPO) i Uzupełniająca Płatność Obszarowa (UPO). Nadwyżkę bezpośrednią obliczono, posługując się metodą podaną przez Augustyńską-Grzymek i in. [7]. W ocenie ekonomicznej sprawności technologii posłużono się danymi z ZPD „Bałcyny”. Do obliczenia wartości produkcji biomasy zastosowano ceny rynkowe surowca (kiszonki) w 2012 roku:

1) lucerna siewna, rutwica wschodnia, mieszanka lucerny siewnej i tymotki łąkowej, mieszanka koniczyny łąkowej i tymotki łąkowej według ceny rynkowej surowca przeznaczonego na paszę –  $90 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ,

2) tymotka łąkowa, kupkówka pospolita według ceny rynkowej surowca przeznaczonego na paszę –  $80 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ,

3) kukurydza zwyczajna według ceny rynkowej surowca przeznaczonego na paszę –  $120 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ,

4) sorgo cukrowe według ceny rynkowej surowca przeznaczonego na paszę –  $100 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ,

5) miskant olbrzymi przeliczono proporcjonalnie na podstawie ceny słomy przeznaczonej dla ciepłowni ( $200\text{--}300 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$  przy około 15% wilgotności) –  $90 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ,

6) miskant cukrowy przeliczono proporcjonalnie na podstawie ceny słomy przeznaczonej dla ciepłowni ( $200\text{--}300 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$  przy około 15% wilgotności) –  $115 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ .

W ekonomicznej ocenie technologii produkcji biomasy przeznaczonej do konwersji na biogaz uwzględniono następujące mierniki:

- nadwyżka bezpośrednia (ang. *Gross Margin*) – wartość pieniężna produkcji uzyskana z 1 ha ( $W_p$ ) pomniejszona o koszty bezpośrednie ( $K_b$ ) poniesione na wytworzenie tej produkcji:

$$GM = W_p - K_b$$

- koszt jednostkowy produkcji ( $K_j$ ) – koszt wytworzenia 1 t suchej masy, jako iloraz kosztów ogółem ( $K_{og}$ ) oraz plonu suchej masy z 1 ha ( $P_n$ ):

$$K_j = \frac{K_{og}}{P_n}$$

- wskaźnik opłacalności produkcji ( $O_p$ ) – wyraża stopień pokrycia wartością produkcji ( $W_p$ ) kosztów poniesionych na jej wytworzenie ( $K_{og}$ ):

$$O_p = \frac{W_p}{K_{og}} \cdot 100$$

- efektywność krańcowa ( $E_k$ ) – określa efektywność dodatkowych nakładów poniesionych w technologii wysokonakładowej (konwencjonalnej) ( $\Delta W_p$ ) w odniesieniu do technologii średnionakładowej (integrowanej) ( $\Delta K_p$ ):

$$E_k = \frac{\Delta W_p}{\Delta K_{og}}$$

### **3.4. Analiza statystyczna**

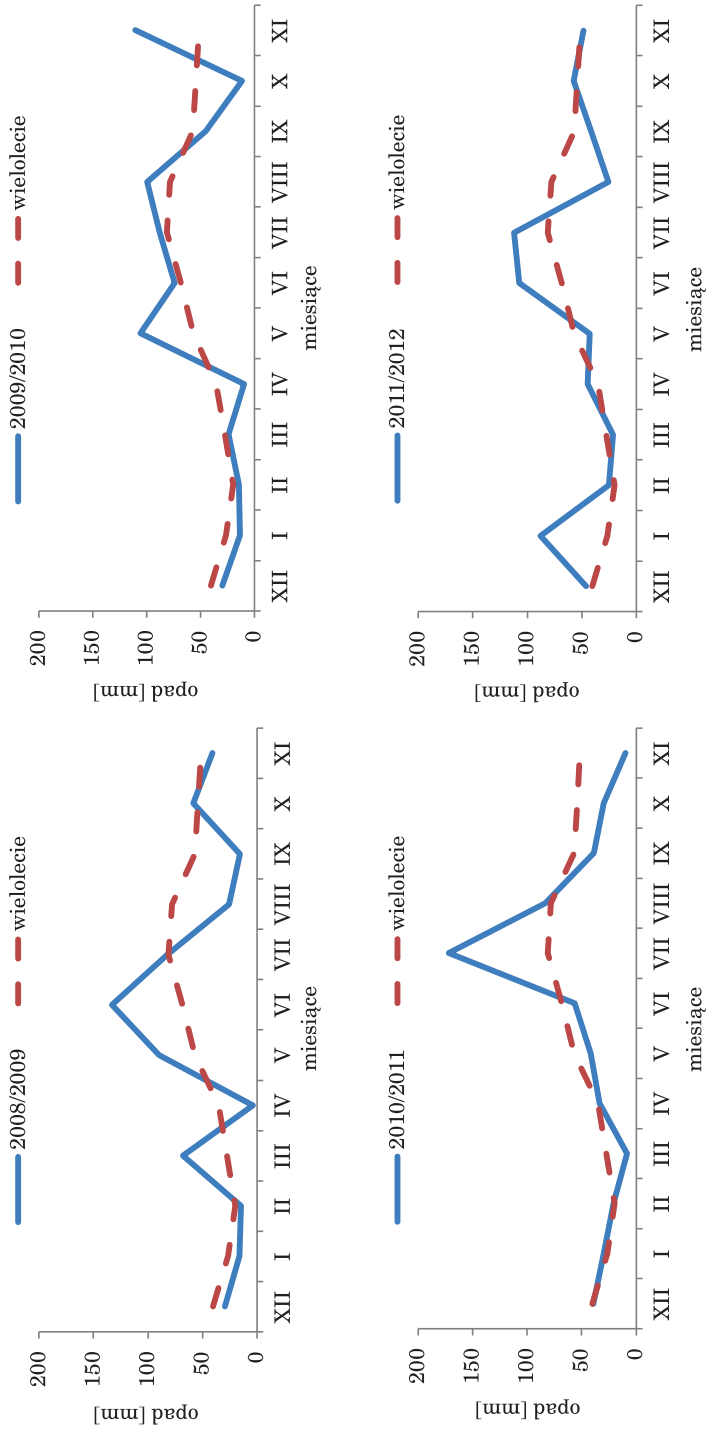
Wyniki uzyskane z doświadczeń polowych ściśłych i łanowych oraz z analiz laboratoryjnych opracowano statystycznie zgodnie z układem doświadczenia. Obliczenia wykonano metodą analizy wariancji ANOVA za pomocą programu STATISTICA 8.0®. Syntezę analizy wariancji przeprowadzono w modelu mieszanym, traktując lata jako czynnik losowy. Do oceny istotności różnic pomiędzy średnimi obiektowymi zastosowano test porównań wielokrotnych Tukeya przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

## **4. Plony biomasy badanych gatunków roślin**

### **4.1. Agrometeorologiczne uwarunkowania plonowania roślin**

Miesiące zimowe 2009 roku charakteryzowały się średniobową temperaturą powietrza zbliżoną do wieloletniej z tego okresu. Opady w styczniu i lutym były nieznacznie mniejsze od średniej z wielolecia, a w marcu były o 40 mm większe (rys. 4.1). Kwiecień był ciepły i zarazem bardzo suchy (tylko 3,7 mm opadu). Okres posuchy utrzymywał się do trzeciej dekady maja, w której to opady (76,3 mm) znacząco przewyższały średnią wieloletnią dla całego miesiąca (tab. 4.1). W czerwcu średniobowa temperatura powietrza była o 1°C niższa od temperatury wieloletniej, przy czym bardzo chłodne były pierwsza i druga dekada tego miesiąca. Niska temperatura powietrza powiązana była z obfitymi opadami deszczu (133,1 mm), które prawie dwukrotnie przewyższyły średnią sumę wieloletnią. Deszczowy również okazał się początek lipca i dzięki tym opadom średnia ich ilość dla tego miesiąca była identyczna jak w wieloleciu. W sierpniu i wrześniu wystąpiła susza (tab. 4.1). W październiku i listopadzie opady były zbliżone do średniej wieloletniej. Ostatni miesiąc tego roku charakteryzował się nieco niższą temperaturą od średniej wieloletniej (o 0,4°C) i o jedną trzecią mniejszymi opadami (tab. 4.1).

Opady w okresie zimowym 2010 roku były mniejsze od tych z wielolecia, a temperatura powietrza od stycznia do marca znacząco mniejsza od średniej wieloletniej (rys. 4.1). W północno-wschodnim regionie zima była mroźna. Niedobór opadów wystąpił w kwietniu (mniejsze o 73% w porównaniu z wieloleciem). Mały zapas wody pozimowej i małe opady w kwietniu negatywnie wpływały na początkowy wzrost i rozwój roślin. Temperatura w maju (12,0°C) była zbliżona do średniej wieloletniej. Opady w tym miesiącu prawie



Rys. 4.1. Sumy opadów [mm] w latach uprawy roślin energetycznych (ZPD Bałcyny 2008–2012)

dwukrotnie przewyższyły wartość wieloletnią, uzupełniając niedobory wody glebowej. Opady i temperatura w czerwcu nie odbiegały znacząco od tych z wielolecia (tab. 4.1). Wysoka temperatura występująca w lipcu (20,8°C) połączona z opadami rzędu 88 mm korzystnie oddziaływała na dynamikę wzrostu roślin. Sierpień i wrzesień charakteryzował się znacznie niższą temperaturą powietrza od średniej wieloletniej. W listopadzie wystąpiły ponad dwukrotnie większe opady w stosunku do wielolecia. Początek zimy był bardzo chłodny z opadami zbliżonymi do średniej z wielolecia.

W styczniu i lutym 2011 roku opady były zbliżone do danych z wielolecia (rys. 4.1). Temperatura stycznia była wyższa (o 1,9°C), a lutego znacznie niższa (o 3,5°C) od wieloletniej. Marzec charakteryzował się bardzo niskimi opadami (8,6 mm wobec średniej z wielolecia wynoszącej 27 mm). Kwiecień i maj były ciepłe (9,7 i 13,6°C) o opadach zbliżonych do sumy wieloletniej (razem 92 mm). Tendencja do wyższej niż w wieloleciu temperatury i mniejszych opadów utrzymywała się również w czerwcu. Lipiec natomiast wyrównał niedobory wody. Opady wynosiły 171,9 mm i ponad dwukrotnie przewyższały sumę z wielolecia. W kolejnym miesiącu wystąpiły opady nieco wyższe w porównaniu z wieloleciem i temperatura powietrza zbliżona do wieloletniej. Wrzesień był bardzo ciepły (14,6°C) i suchy (38,9 mm). W październiku i listopadzie utrzymywał się niedobór wilgoci w glebie, a w grudniu opady nieznacznie przekroczyły wartość z wielolecia. Ostatni kwartał roku był cieplejszy niż w wieloleciu (tab. 4.1).

Tabela 4.1

Warunki wilgotnościowe oraz termiczne produkcji biomasy traw oraz bobowatych i ich mieszanek w badaniach polowych (ZPD Bałcyny 2009–2012)

Lata	Spoczynek roślin	Wzrost wiosenny			Wzrost letni			Wzrost jesienny	Średnio
	(XII–III)	IV	V	VI	VII	VIII	IX	(X–XI)	
Suma opadów (mm)									
Wielolecie	113,7	35,2	56,7	68,3	81,3	78,1	57,1	105,4	595,8
2009	128,3	3,7	89,6	133,1	82,2	25,7	15,6	99,3	577,5
2010	80,9	9,4	105,5	73,7	87,8	99,3	45,0	121,6	623,2
2011	97,9	33,7	41,5	56,2	171,9	83,6	38,9	39,5	563,2
2012	179,9	44,7	42,5	107,2	112,2	25,7	41,0	106,1	659,3
Średnia temperatura dobową powietrza (°C)									
Wielolecie	-1,6	6,6	12,4	15,7	16,5	18,2	12,6	5,5	7,2
2009	-0,9	9,7	12,2	14,7	18,9	18,5	14,7	5,6	8,0
2010	-2,9	7,9	12,0	15,7	20,8	19,3	12,2	4,8	7,2
2011	-3,1	9,7	13,6	17,5	18,0	18,1	14,6	5,9	7,5
2012	-0,9	8,4	13,9	15,2	19,0	17,9	14,0	6,4	8,1

I–XII miesiące kalendarzowe, wielolecie: 1961–2001



Znaczne zimowe obniżenie temperatury w 2012 roku rozpoczęło się w drugiej połowie stycznia i trwało do 25 lutego. Temperatura średniodobowa w I dekadzie lutego wynosiła  $-17,6^{\circ}\text{C}$ , przy grubości pokrywy śnieżnej wynoszącej 13–17 cm. Zima obfitowała w opady, szczególnie w styczniu. W pierwszym kwartale odnotowano opady wynoszące 133,9 mm (dwukrotnie większe niż w wieloleciu). Temperatura marca była już znacznie wyższa od średniej wieloletniej. Opady w kwietniu przewyższyły wartość wieloletnią, natomiast w maju były niższe o 14,2 mm. Czerwiec i lipiec obfitowały w opady, które znacząco przekroczyły średnie wartości z wielolecia i wynosiły odpowiednio 107 i 112 mm. Lipiec był bardzo ciepły ze średnią temperaturą powietrza wyższą o  $2,5^{\circ}\text{C}$  w porównaniu z wieloleciem. Sierpień był suchy z opadami rzędu jednej trzeciej wartości wieloletniej. Niedobór opadów utrzymywał się również we wrześniu.

Głównym czynnikiem siedliskowym wpływającym na produktywność roślin jest dostępność wody. Ma ona szczególne znaczenie w krytycznym okresie zapotrzebowania, a więc w czasie intensywnego wzrostu [49, 183, 231]. W Bałcynach najkorzystniej na plon biomasy oddziaływała duża suma opadów w kwietniu, maju i czerwcu, a więc w okresie największej produktywności roślin.

Reasumując należy stwierdzić, że układ warunków agrometeorologicznych w roku 2009 w Bałcynach był najmniej korzystny do plonowania badanych gatunków roślin energetycznych. Zdecydował o tym rozkład opadów w okresie wegetacji, a w szczególności drastyczne niedobory opadów przez 5 dekad wiosną (kwiecień + 2 dekady maja) wpływające na przesuszenie gleby, a także zbyt małe sumy opadów w sierpniu i wrześniu (30% średniej z wielolecia dla tego okresu) limitujące przyrost biomasy.

Rok 2010 był bardziej korzystny od poprzedniego dla plonowania roślin energetycznych. W czasie dużego zapotrzebowania na wodę (maj – czerwiec – lipiec) występowały obfitsze niż zwykle opady. Gromadzenie suchej masy organicznej w sierpniu i wrześniu mogło być hamowane niedoborem wody opadowej (suche – sierpień i wrzesień). Suszę w październiku można uznać za korzystnie spóźnioną dla wydajności biomasy zarówno traw, jak i roślin bobowych.

Korzystne warunki agrometeorologiczne wystąpiły w roku 2011. Suma opadów w okresie wegetacji badanych gatunków roślin była najwyższa (~400 mm). Nie występowały widoczne niedobory wody opadowej od wiosny aż do końca pierwszej dekady września. Sucha pogoda, jaka wystąpiła od 10 września do końca października, nie miała już znaczącego wpływu na plony roślin.

W ostatnim roku badań (2012) rośliny przeżywały dobrze pomimo dużych spadków temperatury w lutym (pokrywa śnieżna 13–17 cm). Należy podkreślić dużą sumę (133,9 mm) opadów w okresie styczeń – marzec oraz

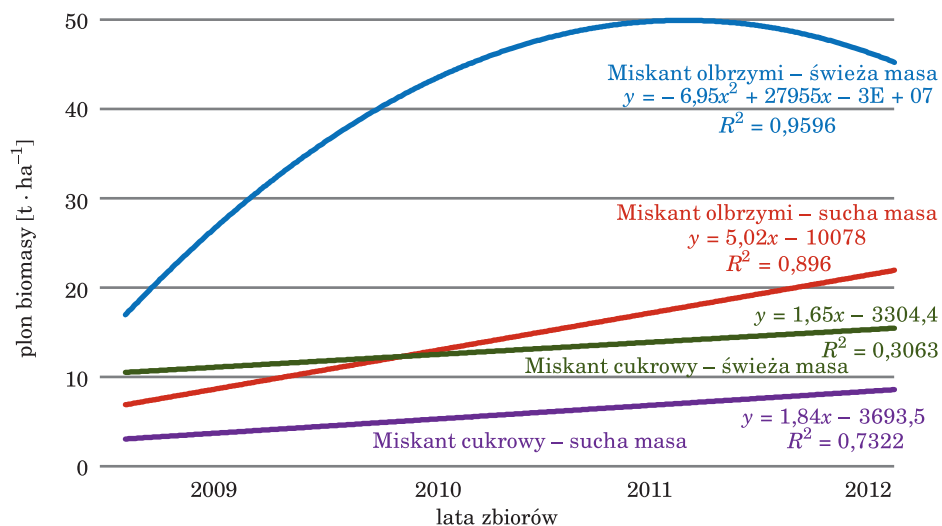
obfite opady od kwietnia do 20 lipca – korzystnie wpływające na dynamikę przyrostu biomasy. Niestety w sierpniu i pierwszej dekadzie września wystąpiła susza, która przy wysokiej temperaturze w tym okresie gwałtownie przyspieszyła zasychanie roślin. Zbiór szczególnie traw  $C_4$  należało przyspieszyć. Nie pozostało to bez wpływu na plony.



Fot. 4.1. Miskant olbrzymi w badaniach własnych – Bałcyny 2011 (fot. T. Sałek)

## **4.2. Plonowanie traw $C_4$**

Plon biomasy poszczególnych gatunków roślin energetycznych był zróżnicowany w latach (tab. 4.2). Najniższy notowano w 2009 r., a taki układ plonów wynikał z niepełnej jeszcze zdolności produkcyjnej obu miskantów (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Krzywe równań regresji obrazujące przyrost biomasy mискanta olbrzymiego i cukrowego w zależności od wieku plantacji (ZPD Bałcyny 2009–2012)

Miskant cukrowy uzyskał relatywnie wysoki plon biomasy już w drugim zbiorze (2 rok wegetacji). Efekt ten potwierdzają badania Ciubiak i in. [51], którzy w drugim roku uprawy mискanta cukrowego otrzymali wzrost plonu biomasy sięgający 79,6%. Główny wpływ na tak wysoką zwyzkę plonu miał dobrze rozwinięty system korzeniowy, który umożliwił efektywniejsze wykorzystanie składników pokarmowych. W badaniach własnych mискant olbrzymi zwiększał plon do trzeciego roku. Takie same zależności wystąpiły w wartościach plonu suchej masy obu gatunków mискantów. Poza zróżnicowaną dynamiką wzrostu gatunków wieloletnich plon biomasy w poszczególnych latach eksperymentu był różnicowany przez układ warunków wilgotnościowych. Wahania w plonie świeżej masy były mniejsze u kukurydzy niż u sorga (tab. 4.2), co nie potwierdza opinii innych autorów [212, 343] mówiących o większej tolerancji tego gatunku na niedobory wody, a nawet na posuchy. W omawianych badaniach niedobór opadów, jaki wystąpił w sierpniu i wrześniu 2012, spowodował przyspieszenie zasychania zarówno kukurydzy, jak i sorga. Miało ono większe skutki (obniżenie plonu suchej masy) u sorga. Było to sprzeczne z doniesieniami Kaczmarek i in. [165], z których wynikało, że rośliny sorga, głównie za sprawą intensywnego systemu korzeniowego oraz zdolności do wyhamowania wzrostu i przejścia w stan uśpienia, łagodniej znoszą okresy posuchy niż kukurydza. Potwierdziła się także zależność opisana u kukurydzy przez Dzieżyca [78], że wyższy poziom nawożenia zmniejsza niekorzystny wpływ suszy na plon biomasy.

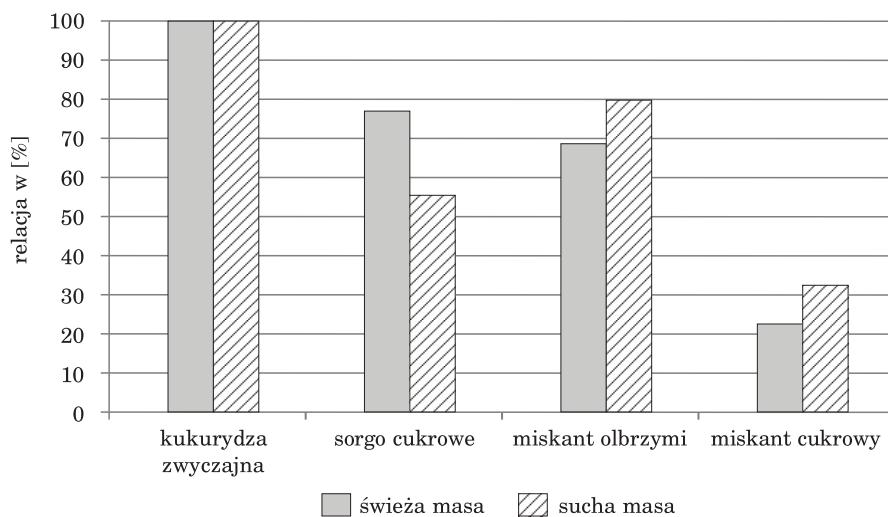
Rys. 4.3. Ranking plonu świeżej i suchej masy traw C<sub>4</sub> (ZPD Balcyny – średnio 2009–2012)

Tabela 4.2

Plon świeżej masy (t · ha<sup>-1</sup>) części nadziemnych traw C<sub>4</sub> (ZPD Balcyny 2009–2012)

Lata zbioru	Kukurydza zwyczajna			Sorgo cukrowe			Miskant olbrzymi			Miskant cukrowy			Średnio		Średnio
	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	
1	70,0	63,9	67,0	50,1	45,7	47,9	19,8	16,4	18,1	8,3	7,0	7,6	37,1	33,3	35,2
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : gatunek – 1,48; technologia – 1,05; gatunek × technologia – 2,09														
2	69,1	68,2	68,6	60,1	52,4	56,2	38,2	35,5	36,8	19,0	14,5	16,7	46,6	42,7	44,6
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : gatunek – 2,26; technologia – 1,59; gatunek × technologia – 3,19														
3	71,3	65,2	68,3	58,2	51,7	55,0	55,1	51,2	53,2	14,7	12,1	13,4	49,8	45,1	47,4
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : gatunek – 2,70; technologia – 1,91; gatunek × technologia – r.n.														
4	56,8	61,6	59,2	49,8	29,3	39,6	44,5	43,6	44,1	14,8	13,5	14,2	41,5	37,0	39,2
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : gatunek – 1,50; technologia – 1,06; gatunek × technologia – 2,13														
Średnio 2009–2012	66,8	64,7	65,8	54,5	44,8	49,7	39,4	36,7	38,0	14,2	11,8	13,0	43,7	39,5	41,6
Średnio 2010–2012	65,7	65,0	65,4	56,0	44,5	50,3	45,9	43,4	44,7	16,2	13,4	14,8	46,0	41,6	43,7
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : lata – 0,97, gatunek – 1,12, technologia – 0,68, lata × gatunek – 0,74, lata × technologia – r.n., gatunek × technologia – 1,37, lata × gatunek × technologia – 2,74														

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna),

I – technologia średnionakładowa (integrowana)



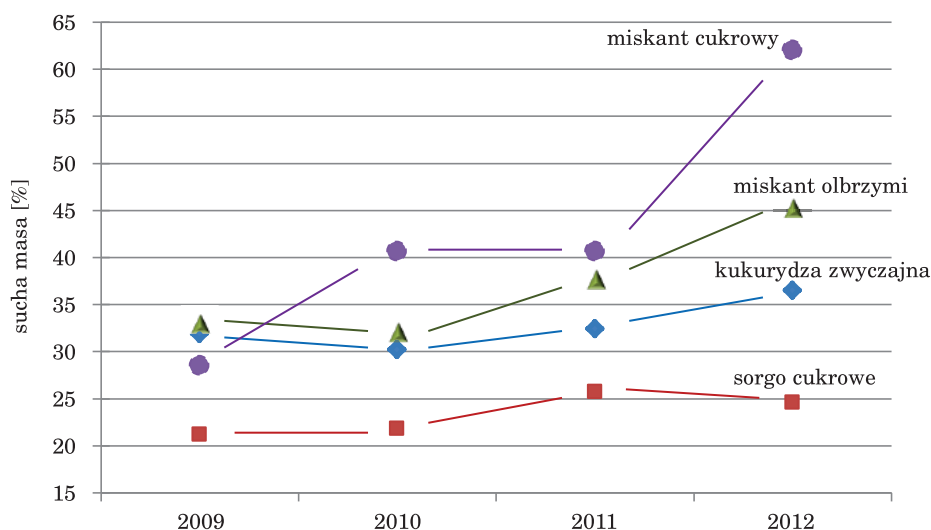
Fot. 4.2. Sorgo cukrowe odm. Sucrosorgho 506 w badaniach własnych – Bałecny 2011 (fot. T. Sałek)

Kukurydza i sorgo plonowały najwyżej w latach 2010 i 2011, miskanty zdecydowanie w 2011 roku o największej sumie opadów w okresie wegetacji. Średnio za 3 lata ranking wydajności porównywanych gatunków był jednoznaczny – kukurydza zwyczajna 65,4 t > sorgo cukrowe 50,3 t > miskant olbrzymi 44,7 t > miskant cukrowy 14,8 t · ha<sup>-1</sup> (rys. 4.3). Zróżnicowanie międzygatunkowe należy ocenić jako duże.

Technologia wysokonakładowa (konwencjonalna) zapewniała większy plon świeżej masy roślin (średnio o 10%). W zasadzie dotyczyło to wyników z wszystkich lat i gatunków. Wyjątkiem były plony kukurydzy w 2012 roku, w którym technologia integrowana o niższym poziomie aplikacji NPK zapewniła większy plon. Średnio z 3 lat (2010–2012) integrowanie technologii poprzez zmniejszenie dawek NPK o 30% skutkowało zmniejszeniem plonu biomasy kukury-

dzy tylko o 2% (granice istotności), sorgo o 20%, miskanta olbrzymiego o 5%, a miskanta cukrowego o 17% (tab. 4.2).

Plon biomasy w czasie zbioru roślin przeznaczonych do zakiszania charakteryzował się zróżnicowaną zawartością suchej masy (rys. 4.4). Największy stan zaawansowania dojrzałości wykazywała biomasa miskanta cukrowego (średnio 43%) i olbrzymiego (średnio 37%), następnie kukurydzy (średnio 33%) i sorgo (średnio 23%). Taki stan dojrzałości rośliny w łanie uzyskiwały pomiędzy 22 września a 12 października (rys. 4.4). Zawartość suchej masy w kukurydzy i sorgo podczas zbioru była zbliżona do wartości optymalnych (przeznaczanych na biogaz) sugerowanych przez literaturę. Z badań Daccorda i in. [62] wynika, że w przypadku kukurydzy najlepszą jakością surowca biogazowego (kiszonki) zapewnia biomasa zbierana przy zawartości suchej masy około 30–35%. Natomiast u sorgo wartość ta powinna przekraczać 25% [180].



Rys. 4.4. Zawartość suchej masy w plonie części nadziemnych traw  $C_4$  podczas zbioru (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Wobec wyraźnego zróżnicowania zawartości wody w biomasy poszczególnych gatunków plon suchej masy zawarty w częściach nadziemnych roślin typu  $C_4$  wyznaczył inny ranking ich wydajności (tab. 4.3). Najwyższą, najkorzystniejszą pozycję zajęła kukurydza zwyczajna, ze średnim plonem z 4 lat na poziomie  $21,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Miskant olbrzymi średnio z 3 lat (2010–2012) plonował na poziomie 17,2 t, ale w 2 ostatnich latach (czyli 3 i 4 po zasadzeniu) uzyskał plon 20 t suchej masy, czyli 90–92% wydajności kukurydzy. Gorzej w porównaniach wypadło sorgo, które z powodu większej niż u kukurydzy zawartości

wody zapewniło plon suchej masy aż o 45% mniejszy i o 31% mniejszy w stosunku do miskanta olbrzymiego. Plon suchej masy miskanta cukrowego to tylko 33% plonu suchej masy kukurydzy. Nie stanowił także konkurencji dla miskanta olbrzymiego (tab. 4.3). Według wielu autorów [44, 196, 232, 328, 329] największą produktywność suchej masy zapewnia kukurydza zwyczajna (od 14,9 do 25,0 t · ha<sup>-1</sup>). Natomiast z badań dotyczących plonowania sorga cukrowego [43, 198, 311, 343] wynika, że gatunek ten pod względem plonu suchej masy dorównuje, a niekiedy nawet przewyższa kukurydzę (12,5–28,1 t · ha<sup>-1</sup> s.m). Zdaniem Kusia i Matyki [204] wieloletnia trawa energetyczna – miskant olbrzymi – już w trzecim roku prowadzenia plantacji dorównuje poziomem plonowania kukurydzy i sorgu. Autorzy w ciągu 4 lat badań (3–6 rok prowadzenia plantacji) uzyskiwali plony suchej masy wynoszące 13,8–24,5 t · ha<sup>-1</sup>.

We wszystkich latach badań plon suchej substancji w biomase był wyższy przy intensywniejszej (K) technologii produkcji. Sam zakres zróżnicowania wynosił 12–14% u sorga i miskanta cukrowego i tylko 2–4% u kukurydzy i miskanta olbrzymiego, podczas gdy dawki NPK stosowane w testowanych technologiach były zróżnicowane aż o 30%.



Fot. 4.3. Sorgo cukrowe w badaniach własnych – Balcyny 2011 (fot. T. Sałek)

Tabela 4.3

Plon suchej masy ( $t \cdot ha^{-1}$ ) części nadziemnych traw  $C_4$  (ZPD Balcyny 2009–2012)

Lata zbioru	Kukurydza zwyczajna			Sorgo cukrowe			Miskant olbrzymi			Miskant cukrowy			Średnio		Średnio
	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	
1	22,4	20,3	21,4	10,9	9,4	10,2	6,5	5,3	5,9	2,4	2,0	2,2	10,6	9,3	9,9
NIR <sub>(P-0,05)</sub> : gatunek – 0,36; technologia – 0,26; gatunek × technologia – 0,51															
2	21,0	20,5	20,7	12,7	11,7	12,2	12,1	11,5	11,8	7,5	6,0	6,8	13,3	12,4	12,9
NIR <sub>(P-0,05)</sub> : gatunek – 0,65; technologia – 0,46; gatunek × technologia – r.n.															
3	22,5	21,7	22,1	14,3	13,9	14,1	20,5	19,5	20,0	5,9	5,0	5,4	15,8	15,0	15,4
NIR <sub>(P-0,05)</sub> : gatunek – 0,88; technologia – 0,62; gatunek × technologia – r.n.															
4	21,6	21,6	21,6	11,0	7,9	9,5	20,1	19,8	19,9	9,0	8,5	8,8	15,4	14,5	14,9
NIR <sub>(P-0,05)</sub> : gatunek – 1,06; technologia – 0,75; gatunek × technologia – 1,51															
Średnio 2009–2012	21,9	21,0	21,4	12,2	10,7	11,5	14,8	14,0	14,4	6,2	5,4	5,8	13,8	12,8	13,3
Średnio 2010–2012	21,7	21,3	21,5	12,7	11,2	11,9	17,6	16,9	17,2	7,5	6,5	7,0	14,8	14,0	14,4
NIR <sub>(P-0,05)</sub> : lata – 0,37, gatunek – 0,49, technologia – 0,26., lata × gatunek – 0,71, lata × technologia – r.n., gatunek × technologia – r.n., lata × gatunek × technologia – 1,05															

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna),

I – technologia średnionakładowa (integrowana)

### 4.3. Plonowanie roślin bobowych (motylkowych) i traw $C_3$

Badane gatunki roślin przeznaczonych na cele biogazowe różniły się istotnie średnimi z 4 lat plonami świeżej masy (tab. 4.4). Z wieloletnich roślin bobowych (motylkowych) plon świeżej masy rutwicy wschodniej wynosił  $59,9 t \cdot ha^{-1}$ , a lucerny siewnej –  $55,2 t \cdot ha^{-1}$ . Z traw cyklu fotosyntezy  $C_3$  wyżej plonowała kupkówka pospolita ( $36,1 t \cdot ha^{-1}$ ) niż tymotka łąkowa ( $30,9 t \cdot ha^{-1}$ ). Mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową dostarczała wyższego plonu świeżej masy ( $55,4 t \cdot ha^{-1}$ ) niż mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką łąkową ( $46,7 t \cdot ha^{-1}$ ). Między mieszankami różnica w plonach świeżej masy wynosiła prawie 19% na korzyść lucerny siewnej z tymotką łąkową. Statystycznie najwyższy plon świeżej masy w 4-letnim cyklu badań zapewniała rutwica wschodnia ( $59,9 t \cdot ha^{-1}$ ). W porównaniu z rutwicą pozostałe gatunki plonowały istotnie niżej: mieszanka lucerny siewnej z tymotką i lucerna siewna – o 8%, mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką – o 22%, kupkówka pospolita – o 40%, a tymotka łąkowa aż o 48%.

Średnie z 4 lat plony biomasy były istotnie zróżnicowane w latach (tab. 4.4). Najwyższe plony świeżej masy badane gatunki roślin energetycznych uzyskały



Tabela 4.4

Plony świeżej masy [ $t \cdot ha^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009-2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio								
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I							
1	58,4	62,5	41,6	40,2	40,9	40,9	35,8	32,6	34,2	43,2	37,6	40,4	78,5	38,3	58,4	62,8	42,3	52,6	53,4	42,2	47,8
2	47,6	42,9	45,3	73,2	73,1	73,1	42,4	37,2	39,8	40,3	39,6	40,0	63,5	44,6	54,1	46,1	38,4	42,3	52,1	46,0	49,1
3	66,7	57,1	61,9	71,0	71,2	71,3	25,3	25,4	25,4	33,3	31,5	32,4	66,4	50,8	58,6	56,4	54,0	55,2	53,2	48,3	50,8
4	56,4	50,3	53,4	52,6	54,5	54,5	25,4	22,8	24,1	32,5	30,6	31,6	61,8	38,9	50,4	39,8	33,8	36,8	45,4	38,2	41,8
x	57,3	53,2	55,2	59,3	59,9	59,9	32,2	29,5	30,9	37,3	34,8	36,1	67,6	43,2	55,4	51,3	42,1	46,7	51,0	43,7	-

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,96; gatunku – 1,18; lata × gatunek – 0,91, technologii – 0,68; gatunek × technologia – 1,67; lata × technologia – 1,37; lata × gatunek × technologia – 3,35

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

w sezonie wegetacyjnym 2011 roku ( $50,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Był to rok mokry i ciepły. Opady od kwietnia do września wynosiły 426 mm, a średnia dobowa temperatura to  $15,3^{\circ}\text{C}$  (tab. 4.1). W pozostałych latach, w których opady w okresie wegetacyjnym (kwiecień–wrzesień) były zbliżone do średnich wieloletnich tego okresu (370 mm), plony świeżej masy były mniejsze od 3% w 2010 roku do 18% w 2012 roku.



Fot. 4.4. Lucerna siewna – Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

W najkorzystniejszych do plonowania warunkach klimatycznych 2011 roku najwyżej plonowała rutwica wschodnia ( $71,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Plony pozostałych gatunków były mniejsze od 13% (lucerna siewna) do 64% (tymotka łąkowa), a różnice statystycznie istotne. Najniżej badane gatunki plonowały w 2012 roku ( $41,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W roku tym najwyżej plonowała rutwica wschodnia ( $54,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), a najniżej tymotka łąkowa ( $24,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

Istotna interakcja lata  $\times$  gatunek dowodzi, że gatunki różniły się plonem świeżej masy w latach badań. W 2009 roku największy poziom plonowania zapewniała lucerna siewna ( $60,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), a w latach 2010–2012 – rutwica wschodnia (odpowiednio  $73,1$ ,  $71,2$  i  $54,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Najniższe plony świeżej masy we wszystkich latach badań uzyskiwała tymotka łąkowa (od  $24,1$  do  $39,8 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Czteroletnie wyniki dowodzą, że najwierniejsza w plonowaniu we wszystkich latach badań była rutwica wschodnia, a następnie mieszanka

Tabela 4.5

Zawartość suchej masy [%] w biomacie roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa			Kupkówka pospolita			Lucerna siewna + tymotka łąkowa			Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa			Średnio			
	K	I	K	I	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I		
1	20,1	19,6	21,5	21,8	21,7	25,2	25,7	25,5	25,8	25,6	25,7	22,7	23,6	23,1	21,7	22,3	22,0	22,8	23,1	23,0
2	22,1	22,9	22,1	20,9	21,5	27,1	26,1	26,6	27,8	27,7	27,8	22,9	23,0	22,9	21,7	22,5	22,1	24,0	23,8	23,9
3	21,1	21,3	21,2	20,6	20,9	26,8	25,2	26,0	25,9	27,0	26,5	23,9	25,5	24,7	22,0	23,7	22,9	23,5	23,9	23,7
4	24,3	24,0	27,2	27,2	27,2	26,9	27,0	26,9	26,9	25,2	26,0	25,9	23,7	24,8	26,5	24,8	25,7	26,3	25,3	25,8
x	21,9	22,0	23,0	22,6	22,8	26,5	26,0	26,3	26,6	26,4	26,5	23,8	23,9	23,9	23,0	23,3	23,2	24,1	24,0	-

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,37; gatunku – 0,45; lata × gatunek – 2,37, technologii – r.n.; lata × technologia – r.n.; lata × gatunek × technologia – 1,29

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

lucerny siewnej z tymotką łąkową oraz lucerna w uprawie monogatunkowej (tab. 4.4).

Porównywane w badaniach technologie produkcji biomasy (konwencjonalna i integrowana) różniły się poziomem nakładów i istotnie różnicowały plon świeżej masy zielonki (tab. 4.4). Ze względu na większe nakłady ponoszone na agrotechnikę wyższy plon świeżej masy zapewniała technologia konwencjonalna. Zmniejszenie nakładów w technologii integrowanej powodowało spadek plonu biomasy naturalnej średnio o ponad 14%.



Fot. 4.5. Plantacja lucerny siewnej – ZPD Bałczyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Gatunki roślin wykazywały różną reakcję w plonie biomasy na stosowane technologie produkcji, czego dowodzi interakcja gatunek  $\times$  technologia. Większość badanych gatunków na uprawę w technologii integrowanej reagowała istotnym spadkiem plonu świeżej masy z powodu zmniejszania nakładów na agrotechnikę, głównie nawozów NPK. Spadek plonów w technologiach integrowanych nie był jednak proporcjonalny do zmniejszanych nakładów. Największy spadek plonowania w technologii integrowanej stwierdzono w mieszance lucerny siewnej z tymotką łąkową – 36%, chociaż zmniejszenie nakładów na technologię integrowaną w ujęciu kosztowym wynosiło 17%, a w energetycznym – 14%. U pozostałych gatunków różnice w plonach świeżej masy pomiędzy technologiami były mniejsze. Mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką łąkową w technologii integrowanej plonowała o 18% niżej w porów-

naniu z technologią konwencjonalną, chociaż spadek nakładów w technologii integrowanej w ujęciu kosztowym wynosił 16%, a w energetycznym – 23% (tab. 4.4).

Lucerna siewna na zmniejszenie nakładów na technologię integrowaną (o 12% w ujęciu kosztowym lub o 3% w ujęciu energetycznym) reagowała 7% spadkiem plonowania (tab. 4.4). Zmniejszenie plonów świeżej masy tymotki łąkowej w technologii integrowanej wynosiło 8%, a kupkówki pospolitej 7%, chociaż nakłady były mniejsze o 15–18% w ujęciu kosztowym i o 13% w ujęciu energetycznym. Tylko rutwica wschodnia na zmniejszenie nakładów w technologii integrowanej (o 12% w ujęciu kosztowym lub o 14% w ujęciu energetycznym) nie reagowała istotnym spadkiem plonu świeżej masy (różnica tylko 2%) w porównaniu z technologią konwencjonalną.

Badane gatunki różniły się istotnie podczas zbioru zawartością suchej masy w biomacie (tab. 4.5). Najwyższą zawartość suchej masy stwierdzono w roślinach kupkówki pospolitej (26,5%) i tymotki łąkowej (26,3%). Istotnie mniej suchej masy zawierały pozostałe gatunki roślin. Najmniejszą zawartością suchej masy podczas zbioru charakteryzowała się lucerna siewna (22,0%) i rutwica wschodnia (22,8%). Również w latach badań w zbieranej biomacie stwierdzono różnice w zawartości suchej masy. W 2012 roku, o mniej korzystnym przebiegu warunków klimatycznych do wzrostu roślin, zawartość suchej masy w zbieranej biomacie była większa (25,8%) niż w 2009 roku (23,0%), w którym układ czynników klimatycznych w okresie wegetacji też nie wpływał korzystnie na plonowanie. W latach badań największe zróżnicowanie w zawartości suchej masy podczas zbioru stwierdzono u rutwicy wschodniej (20,9–27,2%), a najmniejsze u tymotki łąkowej (25,5–26,9%). Najmniej suchej masy zawierała biomasa lucerny siewnej w 2009 roku (19,9%), a najwięcej – kupkówki pospolitej w 2010 roku (27,8%).

Technologie produkcji biomasy nie różnicowały istotnie średniej zawartości suchej masy w fitomasie podczas zbioru. W technologii integrowanej zawartość suchej masy w zbieranej zielonce była więc podobna jak w technologii konwencjonalnej (tab. 4.5). Badane gatunki nie reagowały zmianą zawartości suchej masy na stosowane technologie produkcji (różnice statystycznie nieistotne). W zawartości suchej masy nie stwierdzono też istotności interakcji lata  $\times$  technologia, co świadczy, że działanie tych czynników było niezależne.

Substraty przeznaczone do produkcji biogazu powinny zawierać określoną zawartość suchej masy [167]. Jej zawartość może się jednak zmieniać w zależności od fazy rozwojowej roślin. Wieloletnie rośliny bobowe, ze względu na najkorzystniejszy skład chemiczny, najlepiej zbierać w fazie początku kwitnienia, kiedy zawierają 18–23% suchej masy [359, 368]. Fitomasa traw zbierana w optymalnym terminie zawiera od 20 do 26% suchej masy [13]. Opóźnianie terminu zbioru powoduje nie tylko wzrost zawartości suchej masy, ale też

spadek zawartości białka ogółem kosztem wzrostu włókna surowego, co wpływa też niekorzystnie na wydajność biogazu [119, 167]. W przeprowadzonych badaniach zawartość suchej masy podczas zbioru substratów była porównywalna z wynikami innych badań.

Plony suchej masy, podobnie jak plony świeżej masy, były istotnie zróżnicowane w latach badań (tab. 4.6). Statystycznie najwyższe plony suchej masy uzyskano w latach 2010 i 2011 (średnio dla wszystkich gatunków – 11,6 i 11,7 t · ha<sup>-1</sup>). Istotnie niższe plony suchej masy uzyskano w latach 2009 i 2012 (średnio dla wszystkich gatunków – 10,8 t · ha<sup>-1</sup>). Różnica w plonach suchej masy badanych gatunków pomiędzy skrajnymi pod względem plonowania latami badań wynosiła 8,3%. W warunkach klimatycznych lat 2010 i 2011, które były najkorzystniejsze pod względem plonowania, najwyższe plony suchej masy uzyskała rutwica wschodnia (odpowiednio 15,7 i 14,9 t · ha<sup>-1</sup>). W 2010 roku w porównaniu do najkorzystniejszej plonującej rutwicy wschodniej plony pozostałych gatunków były istotnie mniejsze – od 21% (mieszanka lucerny siewnej z tymotką) do 41% (mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką), a w 2011 roku mniejsze od 3% (mieszanka lucerny siewnej z tymotką) do 55% (tymotka łąkowa). W 2009 roku, a więc w warunkach opadów w okresie kwiecień – wrzesień zbliżonych do średnich wieloletnich w tym okresie (370 mm) i temperatur wyższych o 1°C od średnich wieloletnich, uzyskano istotnie niższe plony suchej masy. W takich warunkach klimatycznych najlepiej plonowała mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową (13,4 t · ha<sup>-1</sup> s.m.), a pozostałe gatunki plonowały istotnie niżej od 10% (lucerna siewna) do 35% (tymotka łąkowa). W 2012 roku w porównaniu z rutwicą wschodnią (14,8 t · ha<sup>-1</sup>) pozostałe gatunki dały plony istotnie mniejsze od 13% (lucerna siewna) do 56% (tymotka łąkowa).

W literaturze podkreśla się, że wielkość plonów roślin w latach badań determinuje układ warunków pogodowych występujący w okresie wegetacji [327]. Większe znaczenie w kształtowaniu plonu ma ilość opadów niż średnie dobowe temperatury powietrza [49, 318, 328]. Zapotrzebowanie na wodę jest związane z gatunkiem i fazą rozwojową roślin i wzrasta w miarę przyrostu masy roślin oraz ich transpiracji. Dla roślin wieloletnich (np. koniczyna łąkowa, lucerna siewna) największe zapotrzebowanie na wodę występuje zwykle w okresie krytycznym w rozwoju, który obejmuje okres dynamicznego przyrostu masy organów wegetatywnych (faza wydłużania pędów) oraz rozwoju organów generatywnych (faza zawiązywania pąków kwiatowych i kwitnienia). Deficyt wody w tych fazach hamuje przyrost masy łodyg i liści, a jej nadmiar zwiększa nasilenie chorób grzybowych, powoduje wyleganie oraz utrudnia zbiór. Zarówno w latach posusznych, jak i w warunkach nadmiernych opadów występują znaczne spadki plonu biomasy. Dla roślin bobowych wieloletnich za optymalne do plonowania przyjmuje się w okresie wegetacji opady

wynoszące 250–460 mm. Niedobory opadów powodują obniżkę plonu lucerny siewnej i koniczyny łąkowej od 3 do 34% [49].

Badane gatunki roślin motylkowych wieloletnich i traw  $C_3$  uprawianych w siewie monogatunkowym oraz ich mieszanki różniły się istotnie plonami suchej masy (tab. 4.6). W 4-letnim cyklu badań najwyższy plon suchej masy uzyskała rutwica wschodnia ( $13,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Pozostałe gatunki statystycznie plonowały istotnie niżej. Najbardziej zbliżony do rutwicy wschodniej plon suchej masy zapewniała mieszanka lucerny siewnej z tymotką ( $13,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), który był wprawdzie mniejszy niż rutwicy tylko o 3%, ale różnica była statystycznie istotna. Plon suchej masy lucerny siewnej w tych samych warunkach siedliskowych wynosił  $12,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  i był istotnie mniejszy niż rutwicy wschodniej o 11%. Trawy  $C_3$  uprawiane bez rośliny ochronnej, w porównywalnych warunkach siedliskowych, dostarczały plonów suchej masy wynoszących od  $8,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (tymotka łąkowa) do  $9,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (kupkówka pospolita). Kupkówka pospolita uzyskała o 15,4% wyższy plon suchej masy niż tymotka łąkowa. Mieszanki roślin bobowych wieloletnich (lucerna siewna lub koniczyna łąkowa) z tymotką łąkową różniły się plonami suchej masy. Wyższy plon suchej masy zapewniała mieszanka lucerny siewnej z tymotką ( $13,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), który o 23% przewyższał plon suchej masy mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką.



Fot. 4.6. Rutwica wschodnia – Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Tabela 4.6

Plony suchej masy [ $t \cdot ha^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio						
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I					
1	11,8	12,2	8,9	8,8	9,0	8,4	8,7	11,2	9,6	10,4	17,8	9,0	13,4	13,7	9,4	11,5	12,1	9,6	10,8
2	10,5	9,8	16,1	15,3	11,5	9,7	10,6	11,2	11,0	11,1	14,5	10,3	12,4	10,0	8,6	9,3	12,3	10,8	11,6
3	14,1	12,2	15,1	14,7	6,8	6,4	6,6	8,6	8,5	8,6	15,9	12,0	14,4	12,4	12,8	12,6	12,1	11,3	11,7
4	13,9	12,1	15,3	14,3	6,8	6,25	6,5	8,7	7,7	8,2	16,0	9,2	12,6	10,6	8,4	9,5	11,9	9,6	10,8
x	12,5	11,6	13,9	13,3	8,5	7,7	8,1	9,9	9,2	9,6	16,1	10,4	13,2	11,7	9,8	10,7	12,1	10,3	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,18; gatunku – 0,32; lata × gatunek – 0,64, technologii – 0,18; gatunek × technologia – 0,45; lata × technologia – 0,37; lata × gatunek × technologia – 0,91

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio



W technologii konwencjonalnej plony suchej masy były większe niż w technologii integrowanej. Wzrost plonu w technologii konwencjonalnej wynosił ponad 17% i był statystycznie istotny. Istotnie mniejsze plony suchej masy w technologii integrowanej występowały we wszystkich latach badań. Największe różnice w plonach suchej masy na korzyść technologii konwencjonalnej stwierdzono w 2009 roku – 26%, a najmniejsze w 2011 roku – 7% (tab. 4.6).

Badane gatunki wykazywały istotne zróżnicowanie w plonach suchej masy pomiędzy technologiami. Lucerna siewna na zmniejszenie nakładów w technologii integrowanej reagowała spadkiem plonu suchej masy o ponad 8%, a rutwica wschodnia – o 4%. Zmniejszenie nakładów na uprawę tymotki łąkowej powodowało spadek plonu suchej masy o ponad 9%, a u kupkówki pospolitej spadek ten wynosił 7%. Największy spadek plonu suchej masy w technologii integrowanej pod wpływem zmniejszenia nakładów na produkcję wystąpił w mieszankach roślin bobowych z tymotką łąkowa. W mieszance lucerny siewnej z tymotką różnica ta wynosiła 35%, a w mieszance koniczyny łąkowej z tymotką łąkową – 14% (tab. 4.6).

Nieżywnościowe gatunki wieloletnie, dostarczające biomasy lignocelulozowej, pozwalają osiągnąć pod względem energetycznym dużo wyższą produktywność niż typowe rośliny żywnościowe [81, 158, 325]. W przeprowadzonych badaniach najkorzystniej plonowały wieloletnie rośliny bobowe. Wysokie plony rutwicy wschodniej w omawianych badaniach (średnio  $13,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) znajdują potwierdzenie również w badaniach innych autorów [139, 302, 320, 321, 368], w których plony suchej masy wahały się od  $6,8$  do  $19,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Uzyskane w badaniach własnych plony suchej masy lucerny siewnej ( $12,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) są porównywalne z wynikami badań Borowieckiego [29], Jelinowskiej i Magnuszewskiej [155], Wilczka i Ćwintala [362], Radkowskiego i Grygierzec [278], w których plony suchej masy wynosiły od  $10,9$  do  $23,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Uzyskane w badaniach własnych plony suchej masy traw należących do roślin fotosyntezy cyklu  $C_3$  w porównaniu z wieloletnimi roślinami bobowymi były dość niskie (tymotka łąkowa –  $8,1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , kupkówka pospolita –  $9,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W dotychczasowych badaniach [103, 124, 155] trawy  $C_3$  uprawiane w warunkach intensywnego nawożenia mineralnego, w zależności od gatunku, uzyskiwały plony suchej masy wynoszące od  $6,9$  do  $22,0 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . W badaniach własnych plony suchej masy mieszanek roślin bobowych wieloletnich z trawami były duże (lucerna siewna z tymotką –  $13,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , koniczyna łąkowa z tymotką –  $10,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), jednak mieściły się w dolnych przedziałach plonów biomasy mieszanek lucerny siewnej z trawami ( $11,2$ – $23,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) uzyskiwanych przez Borowieckiego [29], Jelinowską i Magnuszewską [155], Harasim [124] czy mieszanek koniczyny łąkowej z trawami ( $8,7$ – $17,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) uzyskanych w badaniach Bawolskiego [18], Nowaka i Sowińskiego [249] oraz Harasim [124].

Tabela 4.7

Plon kiszzonej roślin energetycznych [ $t \cdot ha^{-1}$ ] (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio					
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I				
1	57,5	61,5	40,0	38,7	34,3	31,2	32,7	34,8	37,4	73,5	35,8	54,7	59,2	39,9	49,6	50,7	40,3	45,5
2	46,9	42,2	70,1	70,4	40,6	35,6	38,1	36,6	37,0	59,4	41,7	50,6	43,5	36,2	39,8	49,6	43,8	46,7
3	65,6	56,2	68,3	68,6	24,2	24,3	24,3	29,1	30,0	62,2	47,5	54,8	53,2	50,9	52,1	50,7	46,1	48,4
4	55,5	49,5	54,3	50,6	24,3	21,8	23,1	28,3	29,2	57,8	36,4	47,1	37,5	31,9	34,7	43,3	36,4	39,8
x	56,4	52,3	54,4	57,1	30,8	28,2	29,5	32,2	33,4	63,2	40,4	51,8	48,4	39,7	44,0	48,6	41,7	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,93; gatunku – 1,14; lata × gatunek – 2,29; technologii – 0,66; gatunek × technologia – 1,61; lata × technologia – 1,33; lata × gatunek × technologia – 3,21

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Plony kiszonki badanych roślin energetycznych kształtowały się podobnie jak plony świeżej masy. Najwyższy plon kiszonki zapewniała rutwica wschodnia ( $57,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W porównaniu z rutwicą plony kiszonki pozostałych roślin były istotnie mniejsze. Plon kiszonki lucerny siewnej był mniejszy o 6%, mieszanki lucerny siewnej z tymotką – o 10%, mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką – o 24%, kupkówki pospolitej – o 48%, a tymotki łąkowej – o 49% (tab. 4.7). Również lata badań istotnie różnicowały plon kiszonki, a najwyższą jego wartość uzyskano w 2011 roku. W pozostałych latach wydajność kiszonki była mniejsza od 4% w 2010 roku do 18% w 2012 roku (tab. 4.7).



Fot. 4.7. Kwiatostan rutwicy wschodniej – Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Technologie istotnie różnicowały wydajność kiszonki uzyskaną z 1 ha (tab. 4.7). Wyższy jej plon zapewniała technologia konwencjonalna ( $48,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W technologii integrowanej spadek plonu kiszonki wynosił 14%. We wszystkich latach badań technologia konwencjonalna gwarantowała wyższą wydajność kiszonki, od 10% w 2011 roku do 26% w 2009 roku. Również technologie w ramach poszczególnych gatunków różnicowały plon kiszonki. Reakcja gatunków na ten czynnik produkcji była podobna. Wszystkie gatunki w technologii konwencjonalnej zapewniały większy plon kiszonki, od 2% u rutwicy wschodniej do 56% u mieszanki lucerny siewnej z tymotką (tab. 4.7). Istotnie na plon kiszonki wpływała też interakcja lata  $\times$  gatunek  $\times$  technologia (tab. 4.7).

## 5. Energetyczna wydajność i sprawność produkcji biomasy

### 5.1. Trawy C<sub>4</sub>

Plony energii skumulowanej w biomase badanych gatunków roślin należy uznać za duże (kukurydza zwyczajna) i tylko średnie u pozostałych taksonów (tab. 5.1). Taki układ wolumenu energii z 1 ha jest oczywiście pochodną plonu biomasy. Zróżnicowanie w latach należy dla kukurydzy określić jako małe – statystycznie nieistotne, u sorga jako bardziej zmienne (do 33% między latami) – statystycznie udowodnione, a u miskantów jako duże, co wynika przede wszystkim z faktu zmiany ich produktywności w miarę zwiększania wieku nasadzenia (plantacji). Średnio za 3 lata pełnej produktywności taksonów plony energii skumulowanej w biomase były zróżnicowane od 128,5 do 390,6 GJ · ha<sup>-1</sup>, a więc bardzo silnie.

Największą wartością energetyczną charakteryzowała się zebrana biomasa kukurydzy zwyczajnej (390,6 – 100%), następnie miskanta olbrzymiego (82%), sorga cukrowego (54%) i miskanta cukrowego (33%). Zastosowane integrowane, energooszczędne technologie uprawy roślin różniące się przede wszystkim dawkami nawozów mineralnych (średnio o 30%) wpłynęły na zmniejszenie wolumenu energii w plonie kukurydzy zwyczajnej i sorga cukrowego o 12%, miskanta olbrzymiego i cukrowego odpowiednio o 4 i 13% w stosunku do technologii intensywnych (K) pod względem nawożenia.

Wartość energii skumulowanej w plonie mierzonej ciepłem spalania różnicowała się w zależności od uprawianego gatunku. W badaniach Szemplińskiego i Dubisa [329] największy plon energii skumulowanej zapewniała kukurydza zwyczajna (399–435 GJ · ha<sup>-1</sup>), a kolejne w rankingu było sorgo cukrowe (119–352 GJ · ha<sup>-1</sup>). Badania Burczyka [43] dowodzą znacznie większej wartości energetycznej (528 GJ · Wha<sup>-1</sup>) biomasy sorga cukrowego niż kukurydzy (424 GJ · ha<sup>-1</sup>). Kuś i Matyka [204] podają, że plantacja miskanta olbrzymiego zapewnia plon energii w granicach 228–466 GJ · ha<sup>-1</sup>. Potencjalne plony energii skumulowanej w plonie innych gatunków traw C<sub>4</sub> są mniejsze i wynoszą: spartinia preriowa – od 114 do 155 GJ · ha<sup>-1</sup> [184], proso różgowate około 227 GJ · ha<sup>-1</sup> [221], mozga trzcinowata – od 214 do 360 GJ · ha<sup>-1</sup> [203]. W plonach biomasy bylin wieloletnich wydajność energii wynosi: ślazowiec pensylwański – 111–257 GJ · ha<sup>-1</sup> [28, 226] różnik przerośnięty – 234–298 GJ · ha<sup>-1</sup> [222]. Z badań Budzyńskiego i in. [38] wynika, że z 1 ha roślin oleistych można uzyskać od 69 do 205 GJ · ha<sup>-1</sup> energii zawartej w całej biomase części nadziemnych. Natomiast Kozłowski i in. [189] podają, że z uprawy rośliny bobowatych, głównie wysokowydajnej energetycznie rutwicy



Fot. 5.1. Kukurydza zwyczajna w badaniach własnych – Balczyny 2011 (fot. T. Sałek)

wschodniej można uzyskać nawet  $270 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Duży plon energii gwarantuje uprawa wierzby, gdzie w zależności od częstotliwości zbioru uzyskuje się od 257 do  $1\,262 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$  [324].

W niniejszych badaniach nakłady energii ponoszone na wytworzenie biomasy były wysoce zróżnicowane tak pomiędzy gatunkami, jak i technologiami. W strukturze nakładów energii na uprawę główną pozycję stanowiły oczywiście nawozy (rys. 5.1). W technologiach wysokonakładowych (K) były one u kukurydzy i sorga o 27–35% większe, a u miskantów o 24% wyższe niż w technologiach integrowanych (I).

Tabela 5.1

Wartość energetyczna ( $GJ \cdot ha^{-1}$ ) plonu biomasy traw typu C<sub>4</sub> (ZPD Bałczny 2009–2012)

Lata zbioru	Kukurudzka zwyżajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy		Średnio				
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I			
1	407,9	369,8	193,3	166,7	120,1	97,5	108,8	43,2	36,8	40,0	191,1	167,7	179,4
2	382,2	372,4	225,3	207,6	223,1	212,9	218,0	138,0	110,6	124,3	242,2	225,9	234,0
3	410,0	394,0	252,4	245,3	379,3	360,0	369,7	108,0	91,4	99,7	287,4	272,7	280,1
4	392,8	392,4	194,7	140,0	371,3	365,4	368,4	166,2	156,6	161,4	281,3	263,6	272,4
Średnio 2009–2012	398,2	382,2	216,4	189,9	273,4	259,0	266,2	113,9	98,9	106,4	250,5	232,5	241,5
Średnio 2010–2012	395,0	386,3	224,1	197,6	324,6	312,8	318,7	137,4	119,5	128,5	270,3	254,1	262,2

NIR<sub>(P=0,06)</sub>: lata – 5,11, gatunek – 5,40, technologia – 3,61., lata × gatunek – 10,22, lata × technologia – r.n., gatunek × technologia – r.n., lata × gatunek × technologia – 14,46

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średnionakładowa (integrowana)

Szczegółową strukturę nakładów energii przedstawiono w tabeli 5.2. U gatunków jednorocznych struktura w poszczególnych latach była taka sama. U miskantów natomiast różniła się w roku zakładania plantacji, w pierwszym roku pełnego cyklu wegetacyjnego i w latach następnych. Jest to skutkiem innego zakresu prac uprawowych, jakie wykonywano w tym czasie.

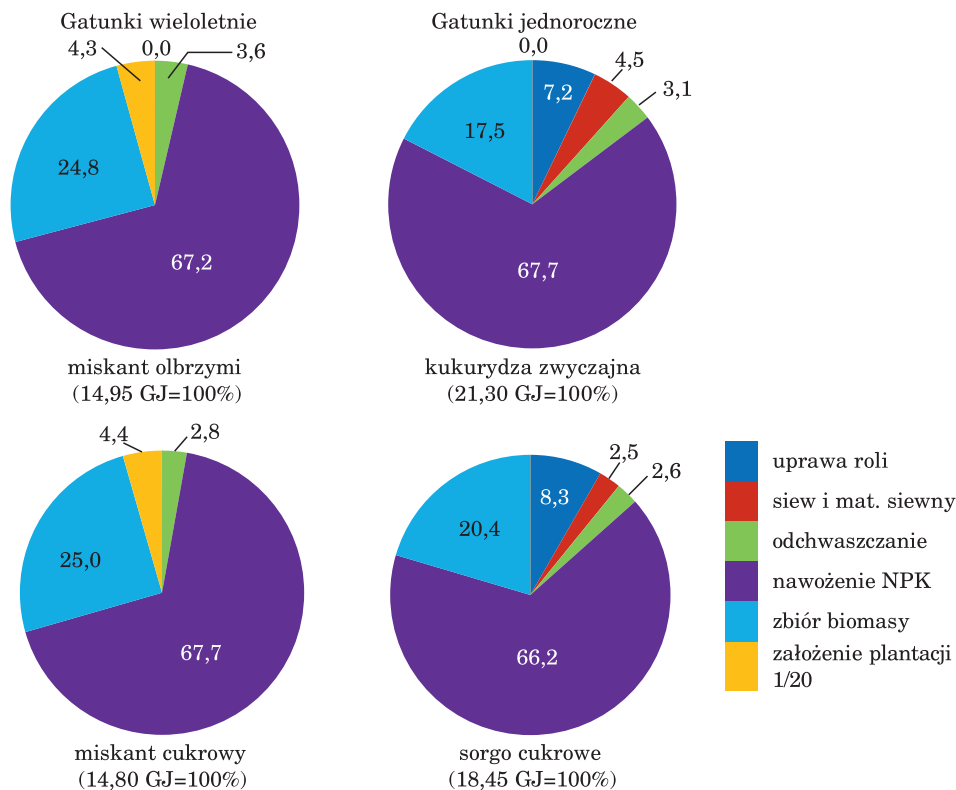
Tabela 5.2  
Struktura nakładów (%) energii na produkcję biomasy traw C<sub>4</sub> (ZPD Bałczyny 2010–2012)

Wyróżniki	Kukurydza zwyczajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy		Średnio		Średnio
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	
Nakłady na technologię produkcji (=100%), w tym:											
Ogółem (GJ · ha <sup>-1</sup> )	23,9	18,7	21,3	15,6	16,5	13,4	16,4	13,2	19,5	15,2	17,4
Według operacji produkcyjnych (%)											
Uprawa roli	6,2	8,1	7,0	9,6	–	–	–	–	6,6	8,8	7,7
Siew i materiał siewny	4,0	4,9	2,1	2,9	–	–	–	–	3,1	4,0	3,5
Odchwaszczanie	2,7	3,5	2,2	3,0	3,3	4,0	2,5	3,2	2,7	3,4	3,0
Nawożenie NPK	71,7	63,9	71,4	61,0	70,6	63,8	71,1	64,4	71,2	63,3	67,2
Zbiór biomasy	15,4	19,6	17,3	23,5	22,2	27,5	22,3	27,7	19,3	24,6	21,9
Założenie plantacji 1/20	–	–	–	–	3,9	4,7	4,1	4,7	4,0	4,7	4,4
Według strumieni energii (%)											
Ciągniki i maszyny	5,3	7,2	6,0	8,7	5,0	6,2	4,9	6,1	5,3	7,1	6,2
Siła robocza	0,6	0,9	0,8	1,1	0,5	0,5	0,4	0,3	0,6	0,7	0,6
Nośniki energii	17,7	23,7	19,9	28,6	17,6	21,8	17,6	21,9	18,2	24,0	21,1
Materiały w tym:	76,4	69,5	73,5	64,1	73,1	66,9	73,1	66,8	74,0	66,8	70,4
nasiona	2,5	2,7	0,5	0,6	–	–	–	–	1,5	1,7	1,6
nawozy	71,5	63,8	71,1	60,9	70,5	63,6	70,9	64,2	71,0	63,1	67,0
pestycydy	2,5	3,1	1,9	2,6	2,7	3,3	2,2	2,8	2,3	2,9	2,6

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna),

I – technologia średnionakładowa (integrowana)

Generalnie największych nakładów na 1 hektar wymagała uprawa kukurydzy zwyczajnej, a najmniejszych – uprawa obu miskantów (rys. 5.1). Odnosząc to jednak do jednostki plonu biomasy (MJ · t<sup>-1</sup>), najmniej energochłonna była produkcja biomasy miskanta olbrzymiego, a następnie kukurydzy zwyczajnej, sorga cukrowego i miskanta cukrowego (tab. 5.3). Różnica pomiędzy jednostkową energochłonnością produkcji obu miskantów była aż 2,5-krotna. Zdecydował o tym mały plon suchej masy organicznej z 1 ha tych gatunków.



Rys. 5.1. Struktura (%) nakładów energii na produkcję biomasy poszczególnych gatunków według operacji technologicznych (ZPD Bałczyny, średnio z 3 lat)

Nakłady energii ponoszone na technologię produkcji roślin energetycznych, w zależności od poziomu intensywności nakładów, u rzepaku ozimego wynoszą 13,6–27,3 GJ · ha<sup>-1</sup> [39], u kukurydzy uprawianej na kiszonkę – 22–24 GJ · ha<sup>-1</sup> [108, 329], u ziemniaka – 41–43 GJ · ha<sup>-1</sup> [177], a wierzby energetycznej – 12–31 GJ · ha<sup>-1</sup> [324]. Według Hryniewicz i Grzybek [136] uprawa miskanta (średnio z 17 lat użytkowania plantacji) jest energooszczędna (2,1–9,2 GJ · ha<sup>-1</sup>). Z porównania nakładów energii (siła robocza, paliwa, sadzonki, środki ochrony roślin, ciągniki i maszyny) ponoszonych na uprawę miskanta wynika, że są one w ujęciu energetycznym mniejsze o około 88% w stosunku do technologii uprawy kukurydzy na ziarno, około 79% w stosunku do rzepaku uprawianego na nasiona i około 84% w porównaniu do pszenicy uprawianej na ziarno.





Fot. 5.2. Miskant olbrzymi wybijający w nowe pędy wiosną – Balcyny 2012  
(fot. T. Sałek)



Fot. 5.3. Plantacja miskanta olbrzymiego w badaniach własnych – Balcyny 2012 (fot. T. Sałek)

W badaniach własnych na produkcję biomasy według zaplanowanych technologii należało wydatkować średniorocznie od 13,2 do 23,9 GJ · ha<sup>-1</sup> energii. Największe wymagania w tym względzie miała technologia uprawy kukurydzy zwyczajnej. Technologia integrowana w porównaniu z konwencjonalną pozwalała zaoszczędzić aż 22% nakładów energii (5,2 GJ · ha<sup>-1</sup>). Mniejszych nakładów energii wymagała technologia uprawy sorga cukrowego (tab. 5.2). Zracjonalizowanie nawożenia spowodowało zmniejszenie wydatkowania energii na produkcję aż o 23%. Technologie produkcji biomasy miskantów wymagały mniejszych nakładów w stosunku do kukurydzy – średnio o 20%. Zastosowanie technologii średnionakładowej pozwoliło zmniejszyć nakłady energii w stosunku do technologii intensywnej średnio o 20%.

Z badań wynika, że o strukturze energii wydatkowanej na technologie w największym stopniu decydują przemysłowe środki produkcji: nawozy mineralne, paliwa, maszyny i narzędzia [152, 177].



Fot. 5.4. Miskant cukrowy w badaniach własnych – Balcyny 2011 (fot. T. Sałek)

W badaniach własnych struktura nakładów skumulowanej energii na uprawę badanych taksonów była wysoce niesymetryczna, bowiem aż 66–71% ogółu nakładów stanowiła energia nawozów mineralnych, 19–24% energia paliwa, a 6–7% energia wydatkowana w postaci ciągników i maszyn. Znikomy udział (0,3–1%) w strukturze nakładów miała praca ludzka. Warto także zauważyć niewielki (1,9–3%) wolumen energii skumulowanej w środkach ochrony roślin.

Struktura nakładów wykonana według operacji produkcyjnych była również niesymetryczna. Średni wydatek energii poniesiony na zabiegi nawożenia NPK stanowił ponad 70% sumy nakładów na całą produkcję. Na drugim miejscu był zbiór biomasy (17–25%), a na trzecim uprawa roli pod kukurydzą i sorgo (6,6–8,8%). U wieloletnich miskantów nakłady na założenie plantacji w ujęciu rocznym (uprawa roli, materiał sadzonkowy i sadzenie) stanowiły 4–4,7%.

Poziom energochłonności zastosowanych technologii uprawy różnicował strukturę nakładów na poszczególne ogniwa agrotechniki (technologii), w tym szczególnie na operacje nawożenia i zbioru – w zakresie i kierunku opisanym w strumieniowej analizie nakładów (tab. 5.2).

Wyniki przedstawione w tabeli 5.3 dowodzą, że jednostkowa produkcja (1 tony) biomasy była najmniej energochłonna u miskanta olbrzymiego, a następnie u kukurydzy zwyczajnej. Nakłady energii na produkcję 1 tony biomasy sorga były 1,75 razy większe, a u miskanta cukrowego nawet 2,4 razy większe w stosunku do wariantu energooszczędnego z miskantem olbrzymim. Zracjonalizowanie nakładów energii skumulowanej w nawozach, wyrażające się w technologii integrowanej, wyraźnie zmniejszało energochłonność produkcji 1 tony biomasy we wszystkich obiektach. To zmniejszenie wynosiło 20% u kukurydzy, 14–16% u sorga oraz miskanta olbrzymiego i tylko 6% u miskanta cukrowego.

Wskaźnik sprawności energetycznej, obliczony z ciepła spalania biomasy i własnego pomiaru nakładów energii na produkcję, należy uznać za korzystny tylko u miskanta olbrzymiego oraz kukurydzy zwyczajnej (odpowiednio 21,5 i 18,6). U sorga cukrowego był mniejszy od oczekiwań, a u miskanta cukrowego zmniejszył się do wartości poniżej 10 (tab. 5.3). Technologie integrowane, a więc o mniejszych nakładach energii na uprawę, charakteryzowały się korzystniejszymi wartościami wskaźnika energetycznej sprawności. U kukurydzy, miskanta olbrzymiego i sorga był to rząd 19–24, a tylko u miskanta cukrowego około 9 (tab. 5.3). W badaniach Szemplińskiego i Dubisa [329] wskaźnik sprawności energetycznej uprawy kukurydzy zwyczajnej wynosił 18,4, a sorga cukrowego 7,5. Natomiast badania Sałka i in. [295] wskazują, że najwyższą sprawność energetyczną uzyskał miskant olbrzymi (około 28), mniejszą kukurydza zwyczajna, ślazowiec pensylwański i miskant cukrowy (16–18) oraz bobowate z trawami (10–12), a znacznie mniejszą kupkówka pospolita i tymotka łąkowa (6–7). W badaniach Budzyńskiego [39] sprawność energetyczna uprawy rzepaku ozimego (nasiona + słoma) wynosiła od 8,3 do 8,9. Szczukowski i in. [324] wykazali, że najwyższą sprawność energetyczną spośród celowych upraw rolniczych zapewnia wierzba. Jej uprawa pozwalała uzyskać wskaźnik sprawności energetycznej wynoszący od 23 (przy corocznym zbiorze) do 43 (przy zbiorze co 3 lata).



## 5.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C<sub>3</sub>

Testowane w badaniach gatunki roślin bobowych wieloletnich, traw C<sub>3</sub> i ich mieszanek wyraźnie różniły się energochłonnością produkcji biomasy, czyli nakładami materiałowo-energetycznymi ponoszonymi na pozyskanie określonej jednostki produkcji [366]. Najbardziej energochłonna była produkcja fitomasy mieszanek lucerny siewnej z tymotką łąkową i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową, która wynosiła odpowiednio 26,8 i 26,6 GJ · ha<sup>-1</sup>. Produkcja biomasy pozostałych gatunków była mniej energochłonna. Najbardziej energooszczędna była produkcja fitomasy rutwicy wschodniej (20,9 GJ · ha<sup>-1</sup>) i lucerny siewnej (21,4 GJ · ha<sup>-1</sup>). W porównaniu z mieszanekami nakłady energii ponoszone na produkcję fitomasy rutwicy wschodniej były mniejsze o 22%, a lucerny siewnej – o 20%. Średnie nakłady energii ponoszone na produkcję biomasy w latach badań wahały się od 22,4 GJ · ha<sup>-1</sup> (2011) do 24,6 GJ · ha<sup>-1</sup> (2009). Różnice w nakładach energii skumulowanej ponoszonych na produkcję fitomasy pomiędzy skrajnymi latami badań były więc dość duże i wynosiły ponad 9%. Wynikały one przede wszystkim z dodatkowych nakładów energii wydatkowanej na zbiór trzeciego pokosu fitomasy u niektórych roślin (tab. 5.4). Wielkość nakładów energetycznych ponoszonych na technologię produkcji znajduje potwierdzenie w innych badaniach. W badaniach Gorzelanego i in. [108] całkowite nakłady energetyczne ponoszone na uprawę kukurydzy na kiszonkę były większe (24,3 GJ · ha<sup>-1</sup>) niż na ziarno (21,2 GJ · ha<sup>-1</sup>). Harasim [123] wykazał, że nakłady energetyczne na produkcję mieszanki traw wynosiły 28,6 GJ · ha<sup>-1</sup>, na uprawę mieszanki koniczyny łąkowej z kostrzewą łąkową – 27,6 GJ · ha<sup>-1</sup>, mieszanki lucerny siewnej z rajgrasem wyniosłym – 27,5 GJ · ha<sup>-1</sup>, a kukurydzy na kiszonkę – 24,3 GJ · ha<sup>-1</sup>. Na wielkość nakładów energii skumulowanej ponoszonych na prowadzenie plantacji roślin bobowych wieloletnich, traw i ich mieszanek wpływała technologia produkcji. W przeprowadzonych badaniach, podobnie jak w badaniach innych autorów [74, 151, 327, 336], najbardziej energochłonna była technologia wysokonakładowa (konwencjonalna). W technologii integrowanej nakłady energetyczne na uprawę wynosiły 22,9 GJ · ha<sup>-1</sup> i były mniejsze o 7,3% niż w technologii konwencjonalnej (tab. 5.4). W latach 2009 i 2010 różnice w nakładach energii ponoszonych na technologię integrowaną były mniejsze odpowiednio o 4,3 i 4,4%, a w latach 2011 i 2012 – odpowiednio o 10,2 i 10,5%. Technologie produkcji biomasy różnicowały nakłady energii ponoszone na poszczególne gatunki roślin energetycznych. W technologii integrowanej produkcja fitomasy rutwicy wschodniej była mniej energochłonna o 1,4%, lucerny siewnej – o 3,2%, kupkówki pospolitej – o 13,1%, tymotki łąkowej – o 13,4%, mieszanki lucerny siewnej z tymotką – o 14,2%, a mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką – o 23,3% niż w technologii konwencjonalnej (tab. 5.4).

Tabela 5.4  
 Nakłady energii skumulowanej poniesione na produkcję fitomasy [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ] (ZPD Balcyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna			Rutwica wschodnia			Tymotka łąkowa			Kupkówka pospolita			Lucerna siewna + tymotka łąkowa			Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa			Średnio			
	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	
1	21,9	21,2	21,5	20,7	20,4	20,5	27,3	24,0	25,7	27,9	24,7	26,3	29,1	24,7	26,9	28,7	24,7	26,7	25,9	24,8	24,6	
2	21,6	20,9	21,3	21,4	21,0	21,2	27,3	24,1	25,7	21,1	17,9	19,5	28,9	24,8	26,8	28,5	24,6	26,5	24,8	23,7	23,5	
3	22,0	21,3	21,6	21,3	21,0	21,1	20,5	17,4	18,9	20,9	17,8	19,4	29,0	24,9	26,9	28,6	24,8	26,7	23,7	21,2	22,4	
4	21,7	21,0	21,4	20,8	20,4	20,6	20,4	17,2	18,8	27,7	24,6	26,1	28,4	24,7	26,6	28,3	24,6	26,4	24,6	22,1	23,3	
x	21,8	21,1	21,4	21,0	20,7	20,9	23,9	20,7	22,3	24,4	21,2	22,8	28,9	24,8	26,8	28,5	24,7	26,6	24,7	22,9	22,9	-

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

W nowoczesnych technologiach produkcji roślinnej należy ograniczać nakłady energetyczne ze względu na konieczność poszanowania energii i środowiska [122]. Z tego względu zwraca się uwagę na konieczność stosowania technologii energooszczędnych. W badaniach Jankowskiego [151] nakłady energetyczne na uprawę nasion rzepaku ozimego przeznaczonego na cele energetyczne (produkcja biodiesla), w zależności od intensywności technologii produkcji, wahały się od  $14,0 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$  (technologia niskonakładowa) do  $31,7 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$  (technologia wysokonakładowa). W badaniach Gorzelanego i in. [108] nakłady energetyczne ponoszone na produkcję kisonki z kukurydzy wynosiły  $24,3 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a na produkcję ziarna –  $21,2 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Badane gatunki roślin różniły się istotnie wartością energetyczną plonu biomasy (tab. 5.5). W 4-letnim cyklu badań najwyższą wartość energetyczną plonu biomasy zapewniała rutwica wschodnia ( $241 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) i mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową ( $238 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Wartość energetyczna ich biomasy była statystycznie podobna. Pozostałe gatunki dostarczały w plonie biomasy istotnie mniej energii: od 12% – lucerna siewna do 39% – tymotka łąkowa (tab. 5.5).

Średnia wartość energetyczna plonu fitomasy w latach badań była istotnie zróżnicowana, podobnie jak uzyskane plony biomasy (tab. 5.5). Najwyższe wartości energetyczne plonu biomasy uzyskano więc w latach 2011 i 2010 (odpowiednio  $210$  i  $208 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W pozostałych latach badań (2009 i 2012) wartości energetyczne plonu fitomasy były istotnie niższe (tab. 5.5). W latach badań najwyższą wartością energetyczną plonu biomasy charakteryzowała się rutwica wschodnia (tab. 5.5).

Z badanych technologii produkcji fitomasy statystycznie wyższą wartość energetyczną plonu zapewniała technologia konwencjonalna ( $217 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W technologii integrowanej wartość ta była istotnie mniejsza o 14,7% (tab. 5.5). W technologii integrowanej we wszystkich latach badań wartość energetyczna plonu była istotnie mniejsza niż w technologii konwencjonalnej, a różnice te wynosiły od 5,2% w 2011 roku do 20,7% w 2009 roku (tab. 5.5).

Gatunki różniły się wartością energetyczną plonu biomasy w zależności od technologii jej produkcji, o czym dowodzi istotność interakcji gatunek  $\times$  technologia. Wartość energetyczna plonu fitomasy w technologii konwencjonalnej była istotnie większa niż w integrowanej (tab. 5.5).

Uzysk energii w plonie suchej masy analizowanych roślin energetycznych, czyli różnica między wartością energetyczną plonu a nakładami energii poniesionymi na produkcję fitomasy, była zróżnicowana, zarówno pomiędzy gatunkami, jak i technologiami produkcji (tab. 5.6). Z badanych gatunków roślin największy uzysk energii należy przypisać rutwicy wschodniej ( $221 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

Tabela 5.5  
Wartość energetyczna plonu fitomasy [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ] badanych roślin energetycznych (ZPD Bałczny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio					
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I				
1	207	215	159	156	164	153	159	175	189	320	162	241	247	171	209	217	172	194
2	186	173	286	273	209	176	193	200	202	261	185	223	181	156	169	221	194	208
3	247	214	268	261	124	117	121	157	155	286	233	260	225	231	228	218	202	210
4	241	213	273	254	124	112	118	140	150	288	166	227	191	152	172	213	173	193
x	220	204	247	236	155	140	147	181	168	289	187	238	211	178	194	217	185	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 4,5; gatunku – 5,5; lata × gatunek – 11,1; technologii – 3,2; gatunek × technologia – 7,9; lata × technologia – 6,4; lata × gatunek × technologia – 15,7

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio



Tabela 5.6  
 Uzysk energii [ $GJ \cdot ha^{-1}$ ] w plonie suchej masy badanych roślin energetycznych (ZPD Bałecny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio							
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I						
1	185	194	138	136	137	137	129	133	175	151	163	291	138	215	219	146	183	191	149	170
2	164	152	265	252	259	182	152	167	183	182	183	233	160	197	153	131	142	197	172	184
3	226	193	247	240	244	103	99	101	136	137	137	257	208	233	196	207	202	194	181	187
4	219	192	252	234	243	104	95	100	131	116	124	260	141	201	163	127	145	188	151	170
x	198	183	225	216	221	132	119	125	156	146	151	260	162	211	183	153	168	192	163	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 4,09; gatunku – 4,87; lata × gatunek – 9,82; technologii – 2,87; gatunek × technologia – 7,17; lata × technologia – 5,92; lata × gatunek × technologia – 14,77

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Lata badań istotnie różnicowały uzysk energii w plonie suchej masy. Największy i statystycznie podobny wolumen uzyskano w latach 2010 i 2011 (odpowiednio 184 i 187 GJ · ha<sup>-1</sup>). W pozostałych latach średnia wartość tej cechy była istotnie mniejsza o 7,6–9,1%. Rutwica wschodnia zapewniała najwyższy uzysk energii w plonie w 3 z 4 lat badań i była bezkonkurencyjna – mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową przewyższała rutwicę pod względem tej cechy tylko w 2009 roku (tab. 5.6).

Technologia konwencjonalna, ze względu na wyższe plony suchej masy, zapewniała istotnie wyższy uzysk energii niż technologia integrowana, a różnica ta wynosiła 17,8%. Wszystkie gatunki wykazywały wyższą wartość tej cechy w technologii konwencjonalnej niż w integrowanej (tab. 5.6).

Do intensywnej produkcji na cele biogazowe nadają się gatunki roślin o wysokiej produktywności biomasy z jednostki powierzchni. Takie gatunki powinny charakteryzować się wysokim bilansem energetycznym, czyli różnicą między energią zawartą w biomasie, a energią potrzebną do jej wytworzenia [157, 158, 173, 325]. W analizowanych badaniach statystycznie największą wartość energetyczną plonu biomasy uzyskały rutwica wschodnia (241 GJ · ha<sup>-1</sup>) i mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową (238 GJ · ha<sup>-1</sup>). Pozostałe gatunki roślin uzyskały w plonie biomasy istotnie mniej energii od 12 do 39%. W badaniach Szemplińskiego i Dubisa [329] z 9 ocenianych roślin zdecydowanym liderem pod względem wolumenu energii zawartej w plonie suchej masy była kukurydza, która zakumulowała 376,9 GJ · ha<sup>-1</sup> energii. W porównaniu z kukurydzą wartość energetyczna plonu suchej masy mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką była mniejsza o 36%, a mieszanki lucerny siewnej z tymotką – o 51%. Najmniej energii w plonie biomasy wytworzyła natomiast tymotka łąkowa, której wartość energetyczna biomasy była mniejsza o 70% od kukurydzy. W badaniach Harasima [123] największy plon energii w suchej masie uzyskała kukurydza uprawiana na kiszonkę – 229,1 GJ · ha<sup>-1</sup>. Dorównywała jej pod tym względem mieszanka lucerny siewnej z rajgrasem wyniosłym – 215,5 GJ · ha<sup>-1</sup>. Natomiast wartość energetyczna plonu mieszanki koniczyny łąkowej z kostrzewą łąkową i mieszanki traw była mniejsza i wynosiła odpowiednio 177,2 i 162,1 GJ · ha<sup>-1</sup>.

W badaniach własnych gatunki roślin bobowych wieloletnich i traw C<sub>3</sub> oraz ich mieszanki różniły się energochłonnością jednostkową produkcji (tab. 5.7). Najmniej energochłonna była produkcja 1 t suchej masy rutwicy wschodniej (1,62 GJ · t<sup>-1</sup>). Wprawdzie energochłonność jednostkowa produkcji suchej masy drugiej w rankingu lucerny siewnej była większa o 0,20 GJ · t<sup>-1</sup>, ale różnica ta okazała się statystycznie istotna. Dlatego w porównaniu z rutwicą wschodnią energochłonność produkcji 1 t suchej masy pozostałych roślin energetycznych była większa od 11,1% (lucerna siewna) do 71,6% (tymotka łąkowa). Energochłonność jednostkowa produkcji

Tabela 5.7  
Energochłonność jednostkowa [ $GJ \cdot t^{-1} \cdot s.m.$ ] produkcji roślin energetycznych (ZPD Bałczny 2009-2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio		
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	
1	1,86	1,73	2,31	2,32	3,03	2,86	2,95	2,56	2,53	1,64	2,74	2,10	2,62	2,36	2,47
2	2,05	2,13	1,33	1,37	2,37	2,49	2,43	1,63	1,75	1,99	2,42	2,20	2,86	2,85	2,15
3	1,56	1,75	1,41	1,43	3,01	2,71	2,86	2,09	2,26	1,83	1,92	2,30	1,944	2,12	1,97
4	1,59	1,74	1,36	1,43	2,99	2,80	2,90	3,17	3,18	1,78	2,68	2,68	2,93	2,80	2,46
x	1,77	1,84	1,60	1,64	2,85	2,72	2,78	2,49	2,43	1,81	2,44	2,48	2,59	2,53	2,26

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – r.n.; gatunku – 0,12; lata × gatunek – 0,16; technologii – r.n.; gatunek × technologia – 0,09; lata × technologia – r.n.; lata × gatunek × technologia – 0,17

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

biomasy w latach badań wahała się od 2,03 do 2,36  $\text{GJ} \cdot \text{t}^{-1}$  suchej masy (tab. 5.7). W latach 2010–2012 najmniej energochłonna była produkcja 1 t suchej masy rutwicy wschodniej (1,35–1,42 GJ), a w 2009 roku – lucerny siewnej (1,80 GJ).

Interakcja gatunek  $\times$  technologia produkcji dowodzi, że oceniane technologie różnicowały energochłonność produkcji 1 t suchej masy badanych gatunków roślin energetycznych. Tymotka łąkowa, kupkówka pospolita oraz mieszanki lucerny siewnej z tymotką i koniczyny łąkowej z tymotką istotnie mniejszą energochłonność produkcji 1 t suchej masy uzyskały w technologii integrowanej. Lucerna siewna i rutwica wschodnia w technologii integrowanej wykazywały statystycznie podobną energochłonność jednostkową produkcji suchej masy jak w technologii konwencjonalnej (tab. 5.7).



Fot. 5.5. Rutwica wschodnia na początku fazy kwitnienia – Balcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

W badaniach Harasima [123] energochłonność jednostkowa produkcji suchej masy mieszanki traw wynosiła  $3,24 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ , mieszanki koniczyny łąkowej z kostrzewą łąkową –  $2,86 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ , mieszanki lucerny siewnej z rajgrasem wyniosłym –  $2,34 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ , a kukurydzy na kiszonkę –  $1,94 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ . Bujak i in. [42] uważają, że zwiększenie nakładów na agrotechnikę poprzez

wzrost nawożenia mineralnego powoduje najczęściej wzrost nakładów energetycznych, co skutkuje pogorszeniem energochłonności jednostkowej. Powyższe zależności tylko częściowo znalazły potwierdzenie w badaniach własnych, natomiast lucerna siewna i rutwica wschodnia nie różniły się energochłonnością jednostkową pomiędzy badanymi technologiami.

Weizsacker i in. [353] podają, że produkcja roślinna wyróżnia się najkorzystniejszym spośród wszystkich gałęzi wytwórczości rolniczej wskaźnikiem energetycznej efektywności (od 2 do 10). Duża sprawność energetyczna produkcji roślinnej sprawia, że coraz większego znaczenia na rynku odnawialnych surowców energetycznych nabiera produkcja biomasy. Z porównania wskaźników sprawności energetycznej, czyli stosunku uzyskanego efektu energetycznego w plonie do poniesionych na uzyskanie tego plonu nakładów energii [354], wynika, że z badanych gatunków roślin najkorzystniejszą sprawnością energetyczną charakteryzowała się produkcja rutwicy wschodniej (11,6). Oznacza to, że 1 GJ energii wydatkowany na agrotechnikę tej rośliny powodował prawie 12-krotny przyrost energii w plonie biomasy. Dość korzystną wartość tego wskaźnika uzyskała także lucerna siewna (9,9). Najmniejszą sprawność energetyczną produkcji biomasy w 4-letnim cyklu badań uzyskała tymotka łąkowa (6,6) i mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką (7,3). U tymotki łąkowej wskaźnik ten był prawie dwukrotnie mniejszy niż u rutwicy wschodniej (tab. 5.8). W badaniach Harasima [123] najkorzystniejszą wartość wskaźnika efektywności energetycznej uzyskała kukurydza uprawiana na kiszonkę (9,43). Wskaźnik ten w produkcji mieszanek lucerny siewnej lub koniczyny łąkowej z trawami wynosił 7,84 i 6,42, a w produkcji traw – 5,67. Wskaźniki te są porównywalne z danymi uzyskanymi w niniejszych badaniach.

W badaniach Gorzelanego i in. [108] wyraźnie większą efektywnością energetyczną odznaczała się technologia produkcji kukurydzy na ziarno (2,1) niż na kiszonkę (1,5). W badaniach Wielogórskiej i in. [356] średni wskaźnik efektywności energetycznej kukurydzy na kiszonkę wynosił 3,2. Wielicki [355] podkreśla, że wskaźnik efektywności energetycznej uzależniony jest od wielkości uzyskiwanego plonu. W produkcji roślinnej w przeciętnych warunkach gospodarowania jedna jednostka nakładów energetycznych powinna zapewnić uzyskanie około 4 jednostek energetycznych w plonie. Spośród roślin uprawnych wyższą efektywnością energetyczną wyróżniają się rośliny motylkowate i kukurydza niż rośliny okopowe i inne rośliny niemotylkowate.

Współczynnik energetycznej sprawności produkcji biomasy badanych gatunków roślin był zmienny w latach badań, na co niewątpliwie wywierał wpływ poziom plonowania poszczególnych gatunków. Najsprawniej produkowano biomasę w 2011 roku, gdzie 1 GJ energii wydatkowanej na agrotechnikę powodował 9,3-krotny efekt energetyczny w plonie suchej masy. W pozo-

Tabela 5.8

Wskaźnik sprawności energetycznej roślin energetycznych (ZPD Bałczny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio					
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I				
1	9,5	10,2	7,7	7,7	6,0	6,4	7,3	7,1	7,2	11,0	6,6	8,8	8,6	6,9	7,8	8,4	7,5	7,9
2	8,6	8,3	13,4	13,0	7,7	7,3	9,7	11,2	10,5	9,1	7,5	8,3	6,4	6,3	6,4	9,2	8,9	9,0
3	11,3	10,1	12,6	12,5	6,0	6,7	7,5	8,7	8,1	9,9	9,4	9,7	7,9	9,3	8,6	9,2	9,5	9,3
4	11,1	10,1	13,1	12,5	6,1	6,5	5,7	5,7	5,7	10,1	6,7	8,4	6,7	6,2	6,5	8,8	8,0	8,4
x	10,1	9,7	11,7	11,4	6,5	6,7	7,6	8,2	8,8	10,0	7,5	8,8	7,4	7,2	7,3	8,9	8,5	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,11; gatunku – 0,48; interakcji lata × gatunek – 0,13; technologii – 0,55; gatunek × technologia – 0,58; lata × technologia – 0,18; lata × gatunek × technologia – 0,57

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio



Fot. 5.6. Owijanie folią bel cylindrycznych z biomasa – ZPD Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

stałych latach sprawność energetyczna produkcji biomasy była istotnie mniejsza: od 3,2 do 15,1% (tab. 5.8).

Z porównywanych technologii produkcji biomasy nieco korzystniejszy wskaźnik sprawności energetycznej uzyskała technologia konwencjonalna (8,9) niż integrowana (8,5). Różnica ta wynosiła 4,7% i została potwierdzona statystycznie. Zależności takie występowały w latach 2009, 2010 i 2012. W 2011 roku, w którym uzyskano najwyższe plony biomasy, zależność była odwrotna i korzystniej pod względem energetycznym produkowano biomasa w technologii integrowanej (tab. 5.8). Mieszanka lucerny siewnej z tymotką uzyskała wyższą sprawność energetyczną produkcji biomasy w technologii konwencjonalnej, a kupkówka pospolita w technologii integrowanej. Pozostałe gatunki roślin w technologii konwencjonalnej wykazywały statystycznie podobną sprawność energetyczną jak w technologii integrowanej (tab. 5.8).

## 6. Ekonomiczna sprawność produkcji biomasy

### 6.1. Trawy C<sub>4</sub>

Nakłady finansowe ogółem na uprawę traw C<sub>4</sub> przeznaczonych do konwersji na biogaz były u poszczególnych gatunków zróżnicowane (tab. 6.1). Największe koszty poniesiono na technologię uprawy kukurydzy zwyczajnej (średnio 2 899 zł). Nakłady na technologię produkcji biomasy miskantów były mniejsze w stosunku do kukurydzy o około 23%, a do sorga o 14–18%. Technologia integrowana charakteryzowała się niższym poziomem kosztów na produkcję w stosunku do konwencjonalnej. Zróżnicowanie to było jednakowe u kukurydzy zwyczajnej i sorga cukrowego – odpowiednio o 475–477 zł · ha<sup>-1</sup>, natomiast mniejsze u miskantów – o 254–250 zł · ha<sup>-1</sup>.

Niższy poziom kosztów wpływał na wartości ekonomiczne wyróżników produkcji. W strukturze bezpośrednich kosztów wytwarzania surowca do produkcji biogazu największy udział miały środki produkcji (materiał siewny + nawozy + środki ochrony roślin) stanowiące od 63 do 67% u gatunków jednorocznych do 72% u miskantów. W kosztach materiałowych dominowały wydatki na nawozy. Wśród kosztów pośrednich największą pozycję stanowiły ciągniki i maszyny, a także nośniki energii (tab. 6.1). Koszty pracy ludzkiej wynoszące od 35 do 50 zł · ha<sup>-1</sup> należy uznać za bardzo niskie (tab. 6.1). Również z badań Harasima [123] wynika, że w strukturze bezpośrednich kosztów produkcji mieszanek pastewnych dominującą pozycję zajmowały środki produkcji: nawozy mineralne (30,0–34,8%), paliwa (24,2–25,5%) oraz ciągniki i maszyny (20,4–22,8%). Natomiast struktura kosztów kukurydzy kiszonkowej była znacząco inna niż w badaniach własnych – przeważały koszty paliwa (34,0%), następnie ciągników i maszyn (21,9%), a wydatki pieniężne na nawozy mineralne (17,6%) miały najmniejszy udział w nakładach finansowych.

W badaniach Burczyka [43] uprawa kukurydzy zwyczajnej i sorga cukrowego z przeznaczeniem do konwersji na biogaz była znacznie droższa niż w badaniach własnych. Natomiast Gorzelany i in. [108] w uprawie kukurydzy na kiszonkę stosowali racjonalną, tańszą technologię, w której koszty całkowite produkcji wynosiły 2 563 zł · ha<sup>-1</sup>, a wartości wyróżników ekonomicznych produkcji układały się analogicznie jak w naszych badaniach. W badaniach Harasima [123] koszty bezpośrednie produkcji kukurydzy kiszonkowej wynosiły 3 175 zł · ha<sup>-1</sup>, a jednostkowy koszt produkcji 1 t suchej masy – 250 zł. W wynikach badań tego autora największe nakłady pieniężne ponoszono na materiały (60%), głównie nawozy, nasiona i środki ochrony roślin. Mirowski [234], prowadząc badania z uprawą wierzby jako rośliny wieloletniej, największy udział w strukturze kosztów (ponad 50%) przypisał



Tabela 6.1  
Struktura kosztów (%) poniesionych na produkcję biomasy traw C<sub>4</sub> (ZPD Bałcyny 2010–2012)

Wyróżniki	Kukurydza zwyczajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy		
	K	I	K	I	K	I	K	I	
Koszty ogółem (zł · ha <sup>-1</sup> ) (= 100%), w tym:	3 135,8	2 661,4	2 793,3	2 316,4	2 554,9	2 238,3	2 204,8	1 944,0	2 074,4
Koszty materiałowe (%), w tym:	66,6	61,0	62,8	55,7	59,2	71,2	66,4	67,6	70,0
– nasiona	11,2	13,2	6,8	8,2	7,5	–	–	0,0	0,0
– nawozy	49,5	40,9	49,6	39,7	44,6	45,4	38,2	46,0	39,0
– środki ochrony roślin	5,8	6,9	6,5	7,8	7,1	5,0	5,6	2,6	3,0
– koszt założenia plantacji 1/20	–	–	–	–	–	20,9	22,5	23,7	25,6
Koszty pośrednie (%), w tym:	33,4	39,0	37,2	44,3	40,8	28,8	33,6	27,6	32,4
– ciągniki i maszyny	19,4	22,9	21,9	26,2	24,1	14,0	15,8	13,9	15,7
– siła robocza	1,6	1,8	1,9	2,3	2,1	2,1	2,4	1,5	1,7
– nośniki energii	12,4	14,3	13,4	15,8	14,6	11,2	12,6	10,8	12,2
– koszt założenia plantacji 1/20	–	–	–	–	–	1,5	2,8	1,4	2,8

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średnionakładowa (integrowana)

nakładom finansowym poniesionym na założenie plantacji. W badaniach własnych koszty poniesione na zakładanie plantacji obu taksonów miskantów były wysokie i wynosiły 9 280 i 10 240 zł · ha<sup>-1</sup> i zostały w kosztach bezpośrednich proporcjonalnie rozłożone na wszystkie lata użytkowania plantacji (20 lat).



Fot. 6.1. Zbiór kukurydzy zwyczajnej siewczarnią John Deere 7200 (badania własne) – Bałcyny 2011 (fot. T. Sałek)

Zróznicowana wydajność traw C<sub>4</sub> spowodowała polaryzację kosztów produkcji jednostkowej, czyli 1 t suchej masy substratu pomiędzy badanymi obiektami (tab. 6.2). Były one najkorzystniejsze (małe) u miskanta olbrzymiego (128 zł · t<sup>-1</sup>), a następnie u kukurydzy (135 zł · t<sup>-1</sup>). Koszt produkcji jednej tony suchej biomasy sorga był duży (224 zł · t<sup>-1</sup>), a miskanta cukrowego zdecydowanie najwyższy (308 zł · t<sup>-1</sup>). Obniżenie poziomu nawożenia w technologiach średnionakładowych (I) prowadziło do wyraźnej obniżki kosztu jednostkowego produkcji o 13% tylko u kukurydzy. U miskanta olbrzymiego i cukrowego, a także u sorga zmniejszenie nakładów na nawozy i nawożenie oraz herbicydy powodowało obniżkę plonu biomasy i większą obniżkę wartości pieniężnej plonu niż oszczędności uzyskane na zakupie nawozów i pestycydów w technologii integrowanej.

Wartość pieniężna uzyskanej biomasy była gatunkowo bardzo zróżnicowana od 7 719 zł u kukurydzy do 1 676 u miskanta cukrowego (tab. 6.2). Jeśli więc przyjąć wolumen wartości biomasy kukurydzy za 100, to u sorga stanowił

Tabela 6.2  
Wybrane wyróżniki ekonomicznej efektywności produkcji biomasy traw C<sub>4</sub>(ZPD Bałczyny 2010–2012)

Wyróżniki	Kukurudza zwyczajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy					
	K	I	K	I	K	I	K	I				
Wartość produkcji (zł · ha <sup>-1</sup> )	7 762	7 675	7 719	5 501	4 365	4 933	3 840	3 632	3 736	1 835	1 518	1 676
	NIR <sub>0,05</sub> dla: gatunku – 196,0; technologii – 71,5; gatunek × technologia – 92,3											
Koszty materiałowe (zł · ha <sup>-1</sup> )	2 089	1 622	1 856	1 754	1 289	1 521	1 594	1 317	1 456	1 597	1 314	1 455
Nadwyżka bezpośrednia (zł · ha <sup>-1</sup> )	5 673	6 053	5 863	3 747	3 076	3 412	2 246	2 315	2 280	239	205	222
	NIR <sub>0,05</sub> dla: gatunku – 138,6; technologii – 51,4; gatunek × technologia – 84,6											
Koszty pośrednie (zł · ha <sup>-1</sup> )	1 047	1 039	1 043	1 040	1 027	1 033	645	667	656	608	631	620
Dochód z działalności bez dopłat (zł · ha <sup>-1</sup> )	4 626	5 014	4 820	2 707	2 049	2 378	1 601	1 647	1 624	-370	-426	-398
	NIR <sub>0,05</sub> dla: gatunku – 150,3; technologii – 43,3; gatunek × technologia – 128,3											
Koszty produkcji biomasy ogółem (zł · ha <sup>-1</sup> )	3 136	2 661	2 899	2 793	2 316	2 555	2 239	1 984	2 112	2 205	1 944	2 074
Jednostkowy koszt produkcji (zł · t <sup>-1</sup> s.m. substratu)	144	125	135	225	223	224	132	123	128	304	313	308
Wskaźnik opłacalności produkcji	2,53	2,95	2,74	2,00	1,92	1,96	1,72	1,82	1,77	0,86	0,78	0,82
	NIR <sub>0,05</sub> dla: gatunku – 0,15; technologii – 0,09; gatunek × technologia – 0,11											
Efektywność końcowa technologii konwencjonalnej	0,16	-	-	2,32	-	-	1,93	-	-	3,51	-	-

K – technologia wykonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średniakładowa (integrowana)



Fot. 6.2. Miskant cukrowy – w drugiej dekadzie maja i drugiej dekadzie czerwca (badania własne – Bałcyny 2012) (fot. T. Sałek)

on 63%, u miskanta olbrzymiego – 48%, a miskanta cukrowego tylko 22%. W cesze wartości produkcji z ha wystąpiła interakcja gatunku z metodą produkcji – technologia uprawy kukurydzy nie różnicowała statystycznie wartości zbiorów biomasy, u sorga i miskanta cukrowego korzystniej wypadła technologia wysokonakładowa, a u miskanta olbrzymiego – technologia średnionakładowa. Wyszczególnione różnice tylko u sorga przekroczyły próg istotności statystycznej ( $510 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), wskazując metodę integrowaną jako korzystniejszą. O słuszności wyboru danej technologii najlepiej świadczy wartość nadwyżki bezpośredniej, która waloryzuje testowane gatunki jednoznacznie – kukurydza 100, sorgo 58, miskant olbrzymi 39, miskant cukrowy 4. Ta kategoria ekonomiczna dowodzi (tab. 6.2), że u kukurydzy słuszniejszym jest wybór technologii integrowanej, u sorgo – konwencjonalnej, a u miskanta olbrzymiego i cukrowego obie metody dawały jednakową wartość nadwyżki, przy czym u tego ostatniego była ona bardzo niska (tab. 6.2). Najważniejsza kategoria oceny ekonomicznej, czyli wartość dodana w produkcji (dochód z tej działalności, bez dopłat), była również bardzo zróżnicowana i wykazywała względnie dobry poziom tylko u kukurydzy –  $4\,820 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Wskaźnik opłacalności produkcji biomasy wynosił od 2,53 do 2,95, był wysoki i korzystniejszy przy zastosowaniu technologii średnionakładowej niż wysokonakładowej. W badaniach Gorzelanego i in. [108] wskaźnik ekonomicznej efektywności produkcji kukurydzy był porównywalny i wynosił odpowiednio 2,6 (uprawa na ziarno) i 2,9 (uprawa na kiszonkę). U kukurydzy zwyczajnej obliczony wskaźnik efektywności krańcowej przy zwiększeniu nakładów w technologii konwencjonalnej w stosunku do integrowanej wynosił zaledwie 0,16. Na podstawie tego wskaźnika należy stwierdzić, że intensyfikowanie technologii produkcji było nieopłacalne (tab. 6.2). Natomiast wyższy wskaźnik efektywności krańcowej u sorga cukrowego (2,32), miskanta olbrzymiego (1,93) oraz cukrowego (3,51) wskazuje, iż z ekonomicznego punktu widzenia wybór technologii wysokonakładowej jest bardziej trafny.

Opłacalność produkcji biomasy sorga (wskaźnik 1,9–2,0), a nawet miskanta olbrzymiego (wskaźnik 1,7–1,8) można uznać za średnią (większą niż standardowa produkcja zbóż i rzepaku). W tych gatunkach różnice między technologiami są niewielkie (nieistotne). Należy stwierdzić, że produkcja biomasy miskanta cukrowego była nieopłacalna (wskaźnik <1). Dalsze porównywanie gatunków wg miar ekonomicznych stało się bezprzedmiotowe.

## 6.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C<sub>3</sub>

Badane gatunki roślin bobowych (motylkowych) i traw C<sub>3</sub> oraz ich mieszanki uprawiane na cele energetyczne różniły się kosztami produkcji biomasy (tab. 6.3). Najniższym kosztem produkcji biomasy charakteryzowała się rutwica wschodnia (1 937 zł · ha<sup>-1</sup>). Produkcja biomasy pozostałych roślin była bardziej kosztochłonna (od 0,3 do 14,8%). Najdrożej produkowano biomasę mieszanki lucerny siewnej z tymotką (2 224 zł · ha<sup>-1</sup>) oraz mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką (2 197 zł · ha<sup>-1</sup>) (tab. 6.3). Koszty produkcji biomasy roślin bobowych wieloletnich uprawianych w siewie monogatunkowym w porównaniu z mieszankami były mniejsze od 5% (lucerna siewna) do 17% (rutwica wschodnia). Koszty produkcji biomasy traw typu C<sub>3</sub> w uprawie monogatunkowej były porównywalne z rutwicą wschodnią, ale niższe (od 12 do 13%) w porównaniu z kosztami produkcji mieszanek (tab. 6.3).

W literaturze mało jest odniesień dotyczących porównania kosztów produkcji biomasy roślin energetycznych. W przedstawionych badaniach średnie koszty produkcji biomasy roślin wieloletnich, w zależności od gatunku, wynosiły od 1 937 do 2 224 zł · ha<sup>-1</sup>. Dla porównania w badaniach Harasima [123] bezpośrednie koszty produkcji biomasy były mocno zróżnicowane. Koszty produkcji biomasy w formie siana lub sianokiszonki z mieszanek lucerny siewnej lub koniczyny łąkowej z trawami były większe i wynosiły odpowiednio 2 745 i 2 655 zł · ha<sup>-1</sup>, a z traw na gruntach ornych – 2 555 zł · ha<sup>-1</sup>.

Średnie koszty produkcji biomasy rutwicy wschodniej były wprawdzie niższe niż lucerny siewnej o 8,2%, ale pod względem ich struktury podobne (tab. 6.5). Trawy fotosyntezy cyklu C<sub>3</sub> – tymotka łąkowa i kupkówka pospolita – charakteryzowały się podobnymi średnimi kosztami produkcji fitomasy. Podobny był też w nich udział kosztów materiałowych (około 50%). W kosztach materiałowych największy, chociaż jednocześnie podobny u obu gatunków, udział stanowiły nawozy (49,5 i 47,8%), a w kosztach pośrednich – ciągniki i maszyny (27,5%), siła robocza (3,2%) i nośniki energii (11,3%) (tab. 6.6 i 6.7).

Tymotka łąkowa i kupkówka pospolita charakteryzowały się podobnymi kosztami produkcji biomasy zarówno w technologii konwencjonalnej, jak i integrowanej. Podobnie kształtował się też procentowy udział kosztów (tab. 6.6 i 6.7).

Tabela 6.3  
Koszty produkcji biomasy [ $\text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Balcyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna			Rutwica wschodnia			Tymotka łąkowa			Kupkówka pospolita			Lucerna siewna + tymotka łąkowa			Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa			Średnio		
	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x
1	2 249	1 971	2 110	2 012	1 756	1 884	2 202	1 816	2 009	2 243	1 854	2 049	2 379	1 944	2 162	2 344	1 927	2 136	2 238	1 878	2 058
2	2 220	1 947	2 084	2 056	1 835	1 946	2 236	2 131	2 184	1 945	1 575	1 760	2 394	1 990	2 192	2 334	2 006	2 170	2 198	1 914	2 056
3	2 179	1 929	2 054	2 001	1 773	1 887	1 893	1 550	1 722	1 939	1 596	1 768	2 380	2 007	2 194	2 332	1 981	2 157	2 121	1 806	1 963
4	2 337	2 057	2 197	2 150	1 910	2 030	2 058	1 657	1 858	2 443	2 039	2 241	2 564	2 134	2 349	2 541	2 111	2 326	2 349	1 985	2 167
x	2 246	1 976	2 111	2 055	1 819	1 937	2 097	1 789	1 943	2 143	1 766	1 954	2 429	2 019	2 224	2 388	2 006	2 197	2 226	1 896	–

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Tabela 6.4  
Koszty produkcji biomasy lucerny siewnej i ich struktura (średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 246	100,0	1 976	100,0	2111	100,0
Koszty materiałowe:	1 057	47,1	797	40,3	927	43,9
– nawozy mineralne	970	43,2	667	33,7	819	38,8
– założenie plantacji	87	3,9	130	6,6	109	5,1
Koszty pośrednie:	1 189	52,9	1 179	59,7	1184	56,1
– ciągniki i maszyny	604	26,9	595	30,1	599	28,4
– siła robocza	72	3,2	72	3,7	72	3,4
– nośniki energii	260	11,6	258	13,1	259	12,3
– założenie plantacji	255	11,3	255	12,9	255	12,1

Tabela 6.5  
Koszty produkcji biomasy rutwicy wschodniej i ich struktura (średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 055	100,0	1 819	100,0	1937	100,0
Koszty materiałowe:	943	45,9	714	39,3	829	42,8
– nawozy mineralne	863	42,0	634	34,9	749	38,6
– założenie plantacji	80	3,9	80	4,4	80	4,1
Koszty pośrednie:	1 112	54,1	1 104	60,7	1108	57,2
– ciągniki i maszyny	614	29,9	610	33,5	612	31,6
– siła robocza	75	3,6	75	4,1	75	3,9
– nośniki energii	279	13,6	276	15,2	277	14,3
– założenie plantacji	144	7,0	144	7,9	144	7,4

Tabela 6.6

Koszty produkcji biomasy tymotki łąkowej i ich struktura (średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 097	100,0	1 789	100,0	1943	100,0
Koszty materiałowe:	1 133	54,0	830	46,4	981	50,5
– nawozy mineralne	1 113	53,0	810	45,3	961	49,5
– założenie plantacji	20	1,0	20	1,1	20	1,0
Koszty pośrednie:	965	46,0	958	53,6	962	49,5
– ciągniki i maszyny	538	25,7	535	29,9	536	27,6
– siła robocza	62	2,9	61	3,4	61	3,2
– nośniki energii	221	10,5	219	12,2	220	11,3
– założenie plantacji	144	6,9	144	8,1	144	7,4

Tabela 6.7

Koszty produkcji biomasy kupkówki pospolitej i ich struktura (średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 143	100,0	1 766	100,0	1954	100,0
Koszty materiałowe:	1 174	54,8	806	45,6	990	50,6
– nawozy mineralne	1 118	52,2	750	42,4	934	47,8
– założenie plantacji	56	2,6	56	3,2	56	2,9
Koszty pośrednie:	969	45,2	961	54,4	965	49,4
– ciągniki i maszyny	539	25,2	534	30,2	537	27,5
– siła robocza	63	3,0	64	3,6	64	3,2
– nośniki energii	222	10,4	219	12,4	221	11,3
– założenie plantacji	144	6,7	144	8,2	144	7,4

Średnie z 4 lat koszty produkcji biomasy obu mieszanek roślin bobowych (lucerna siewna i koniczyna łąkowa) z tymotką łąkową były podobne zarówno w obrębie gatunków, jak i technologii. Podobny był też w nich udział procentowy poszczególnych składników kosztów produkcji biomasy (tab. 6.8 i 6.9).

Podobnie jak u wcześniejszych gatunków roślin, w kosztach materiałowych obu technologii największy udział miały nawozy, a w kosztach pośrednich – ciągniki i maszyny (tab. 6.8 i 6.9).



Tabela 6.8  
Koszty produkcji biomasy mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową i ich struktura  
(średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 429	100,0	2 019	100,0	2224	100,0
Koszty materiałowe:	1 335	54,9	962	47,7	1149	51,6
– nawozy mineralne	1 215	50,0	842	41,7	1029	46,2
– założenie plantacji	120	4,9	120	5,9	120	5,4
Koszty pośrednie:	1 095	45,1	1 057	52,3	1076	48,4
– ciągniki i maszyny	612	25,2	597	29,6	605	27,2
– siła robocza	77	3,2	72	3,6	75	3,3
– nośniki energii	261	10,7	244	12,1	253	11,4
– założenie plantacji	144	5,9	144	7,1	144	6,5

Tabela 6.9  
Koszty produkcji biomasy mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką łąkową i ich struktura  
(średnio z lat 2009–2012)

Wyszczególnienie	Technologia				Średnio dla gatunku	
	konwencjonalna		integrowana			
	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%	(zł · ha <sup>-1</sup> )	%
Koszty ogółem	2 388	100,0	2 006	100,0	2197	100,0
Koszty materiałowe:	1 310	54,9	937	46,7	1124	51,1
– nawozy mineralne	1 215	50,9	842	42,0	1029	46,8
– założenie plantacji	95	4,0	95	4,7	95	4,3
Koszty pośrednie:	1 078	45,1	1 069	53,3	1074	48,9
– ciągniki i maszyny	608	25,4	594	29,6	601	27,3
– siła robocza	74	3,1	72	3,6	73	3,3
– nośniki energii	253	10,6	259	12,9	256	11,6
– założenie plantacji	144	6,0	144	7,2	144	6,6

W niniejszych badaniach analiza kosztów produkcji wybranych roślin energetycznych wykazała, że największy udział w ponoszonych nakładach finansowych stanowiły nawozy mineralne (od 38,6% – rutwica wschodnia do 49,5% – tymotka łąkowa). Również w badaniach innych autorów [74, 123, 303] najkosztowniejszymi środkami produkcji okazały się nawozy. W badaniach Harasima [123] w strukturze bezpośrednich kosztów produkcji biomasy traw nawozy mineralne stanowiły 34,8%, a w mieszankach motylkowo-trawiastych – 30–31%.

Tabela 6.10

Wartość produkcji kiszonki [ $\text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio					
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	Średnio			
1	5175	5535	3600	3483	2744	2496	2 620	2784	2 992	6615	3220	4 919	5328	3591	4 460	4444	3518	3 981
2	4221	3798	4 010	6309	6 323	3248	3 048	2984	2 956	5346	3753	4 550	3915	3258	3 587	4337	3820	4 079
3	5904	5058	5 481	6147	6 174	6 161	1936	2464	2 396	5598	4275	4 937	4788	4581	4 685	4473	4060	4 267
4	4995	4455	4 725	4887	4554	4 721	1944	2408	2 336	5202	3276	4 239	3375	2871	3 123	3802	3194	3 498
x	5074	4712	4 893	5236	5137	5 186	2468	2764	2 670	5690	3632	4 661	4352	3575	3 963	4264	3648	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 63,1; gatunku – 187,0; lata × gatunek – 94,8; technologii – 59,2; gatunek × technologia – 85,7; lata × technologia – 43,5, lata × gatunek × technologia – 242,0

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

W przedstawionych badaniach gatunki roślin różniły się wartością pieniężną wyprodukowanej z 1 ha kiszonki (tab. 6.10). Największą wartość finansową uzyskała kiszonka z rutwicy wschodniej ( $5\,186 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W porównaniu z rutwicą wschodnią wartość wyprodukowanej kiszonki z pozostałych roślin energetycznych była istotnie mniejsza. Wartość pieniężna kiszonki była zróżnicowana w latach badań (tab. 6.10). Najwyższą średnią wartość pieniężną kiszonki uzyskano w 2011 roku ( $4\,267 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W pozostałych latach jej wartość pieniężna była istotnie mniejsza – od 4,4% w 2010 roku do 19,0% w 2012 roku.



Fot. 6.3. Tymotka łąkowa – Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Wartość pieniężna plonu biomasy zależała od technologii jej produkcji. Zwiększenie nakładów przemysłowych środków na produkcję biomasy powodowało istotny wzrost jej wartości. Średnia wartość finansowa produkcji biomasy w formie kiszonki w technologii konwencjonalnej była wyższa o 16,9% (różnica istotna) niż w technologii integrowanej (tab. 6.10). Wszystkie gatunki roślin w technologii konwencjonalnej zapewniały wyższą wartość finansową produkcji kiszonki niż w technologii integrowanej. W technologii konwencjonalnej najwyższą wartość pieniężną wyprodukowanej kiszonki uzyskała mieszanka lucerny siewnej z tymotką ( $5\,690 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ), a najniższą – tymotka łąkowa ( $2\,468 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). W technologii integrowanej wartość pieniężna wyprodukowanej kiszonki była niższa od technologii konwencjonalnej od 1,9% (rutwica wschodnia) do 36,2% (mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową) (tab. 6.10).

Tabela 6.11  
Koszty jednostkowe produkcji suchej masy kiszonki [ $z1 \cdot t^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio						
	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x					
1	191	161	225	200	244	217	231	201	193	197	134	216	175	172	204	188	195	199	
2	211	198	128	120	194	220	207	173	144	159	165	194	180	233	233	233	184	185	184
3	155	159	133	121	279	242	261	224	188	206	150	155	153	188	155	172	188	170	179
4	171	170	140	134	301	269	285	280	264	272	160	231	247	241	252	247	216	220	218
x	182	172	157	144	255	237	246	220	197	208	152	199	189	209	211	210	196	193	-

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 1,12; gatunku – 4,36; lata × gatunek – 7,20; technologii – r.n.; gatunek × technologia – 7,70; lata × technologia – 6,10; lata × gatunek × technologia – 9,87

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Ze względu na wysoki plon biomasy z 1 ha i niskie koszty produkcji najtaniej produkowano 1 t suchej masy rutwicy wschodniej (150 zł). Jednostkowe koszty produkcji biomasy pozostałych roślin były istotnie większe: lucerna siewna – o 18%, kupkówka pospolita – o 39%, mieszanka lucerny siewnej z tymotką – o 26%, a mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką aż o 40%. Najdrożej produkowano 1 t suchej masy tymotki łąkowej (246 zł · t<sup>-1</sup>), której koszt w porównaniu z rutwicą wschodnią był większy o 64% (tab. 6.11).



Fot. 6.4. Zbiór podsuszanej biomasy traw w bele cylindryczne (fot. A. Parzonka)

W 4-letnim cyklu badań średnie koszty produkcji fitomasy wynosiły 194 zł · t<sup>-1</sup>. W latach badań najtaniej (179 zł · t<sup>-1</sup>) produkowano biomasę w 2011 roku. W pozostałych latach koszty te wynosiły od 184 do 218 zł · t<sup>-1</sup> i były statystycznie wyższe (tab. 6.11). Zróznicowanie kosztów jednostkowych produkcji fitomasy wynikało przede wszystkim z wydajności roślin w latach badań. Najwyższe plony suchej masy w 2011 roku przełożyły się na najniższe jej koszty jednostkowe, a niskie plony suchej masy w 2012 wpłynęły na najwyższe koszty jednostkowe jej produkcji.

Bezkonkurencyjna w kosztach jednostkowych produkcji fitomasy była rutwica wschodnia (150 zł), która w latach 2010–2012, a więc pełnego jej użytkowania, zapewniała najniższe koszty produkcji 1 t suchej masy na poziomie 124–137 zł. Najdrożej produkowano 1 t suchej masy tymotki łąkowej i kupkówki pospolitej w 2012 roku (odpowiednio 285 i 272 zł), co wynikało przede wszystkim z uzyskanych niskich plonów biomasy (tab. 6.11).

W 4-letnim cyklu badań średnie koszty produkcji 1 t suchej masy w technologii konwencjonalnej (196 zł) nie różniły się istotnie od technologii integrowanej (193 zł). W badaniach Harasima [123] najniższe jednostkowe koszty produkcji biomasy zapewniała mieszanka lucerny siewnej z rajgrasem wyniosłym ( $230 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ). Koszty produkcji 1 t biomasy kukurydzy były wyższe o 87%, mieszanki koniczyny łąkowej z kostrzewą łąkową o 21,7%, a traw na gruntach ornych o 26,0%. W badaniach Jankowskiego [151] dotyczących plonowania rzepaku na nasiona jednostkowe koszty produkcji malały w miarę zmniejszania nakładów na technologię produkcji, osiągając najkorzystniejszą wartość w technologii niskonakładowej. Jednostkowe koszty produkcji 1 t kiszonki badanych roślin energetycznych wahały się od 35 do 68 zł. Najtaniej produkowano kiszonkę z rutwicy wschodniej (35 zł). Koszt produkcji 1 t kiszonki z lucerny siewnej był wyższy o 8%, mieszanki lucerny siewnej z tymotką – o 29%, mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką – o 49%, kupkówki pospolitej – o 69%, a tymotki łąkowej aż o 94% (tab. 6.12).

Pomimo istotnie niższej wartości produkcji kiszonki (tab. 6.10), jej jednostkowe koszty produkcji w technologii integrowanej ( $49 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ) były podobne jak w technologii konwencjonalnej ( $50 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ), a różnica nieistotna (tab. 6.12). Jednostkowe koszty produkcji 1 t kiszonki zależały od gatunku i technologii produkcji. Średnie z 4 lat wyniki badań dowodzą, że u lucerny siewnej i mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką jednostkowe koszty produkcji kiszonki w technologii konwencjonalnej były podobne jak w technologii integrowanej. Rutwica wschodnia, tymotka łąkowa i kupkówka pospolita zapewniały niższe jednostkowe koszty produkcji 1 t kiszonki w technologii integrowanej, a mieszanka lucerny siewnej z tymotką w technologii konwencjonalnej (tab. 6.12).

Wzrost intensywności technologii jest uzasadniony ekonomicznie tylko wtedy, gdy zapewnia uzyskanie wyższej nadwyżki bezpośredniej. W badaniach własnych nadwyżka bezpośrednia z 1 ha była mocno zróżnicowana u poszczególnych gatunków. Wysokość nadwyżki bezpośredniej determinowała poziom wartości produkcji i poziom poniesionych kosztów. Ze względu na największą wartość produkcji biomasy i najniższe koszty jej produkcji najwyższą nadwyżką bezpośrednią charakteryzowała się produkcja rutwicy wschodniej ( $4\,358 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Wartość nadwyżki bezpośredniej u pozostałych roślin była niższa od 9,0 do 68,3%. Najniższą nadwyżkę bezpośrednią uzyskała tymotka łąkowa (tab. 6.13).

Przeprowadzone badania wykazały, że według kryterium nadwyżki bezpośredniej produkcja biomasy była działalnością dochodową. Dla porównania w badaniach Skarżyńskiej [303] wielkość nadwyżki bezpośredniej (bez dopłat) w gospodarstwach rolnych była dodatnia i u poszczególnych gatunków roślin

Tabela 6.12  
Koszty jednostkowe produkcji kiszonki roślin energetycznych [ $\text{zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ] (ZPD Bałecny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio						
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I					
1	39	32	50	45	64	58	61	56	53	55	32	54	43	40	48	44	47	49	48
2	47	46	29	26	55	60	57	52	43	48	40	48	44	54	55	55	46	46	46
3	33	34	29	26	78	64	71	63	55	59	38	42	40	44	39	41	48	43	45
4	42	42	40	38	85	76	80	81	72	77	44	59	51	68	66	67	60	59	59
x	40	39	37	34	71	64	68	63	56	59	39	51	45	51	52	52	50	49	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – r.n.; gatunku – 2,79; lata × gatunek – 1,73; technologii – r.n.; gatunek × technologia – 2,72; lata × technologia – 2,89; lata × gatunek × technologia – 4,23

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Tabela 6.13

Nadwyżka bezpośrednia badanych roślin energetycznych [zł] w latach badań (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio						
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I					
1	4036	4691	2582	2717	1532	1666	1599	1952	1918	1935	5253	2240	3747	3991	2634	3313	3224	2644	2935
2	3158	2994	5357	5612	2068	1770	1919	1870	2180	2025	4026	2797	3412	2620	2327	2474	3183	2947	3065
3	4949	4330	5297	5528	935	1282	1109	1427	1630	1529	4344	3373	3859	3559	3704	3632	3419	3308	3364
4	3923	3644	3936	3833	807	993	900	1112	1354	1233	3799	2267	3033	1997	1887	1942	2596	2330	2463
x	4017	3915	4293	4423	1336	1428	1382	1590	1771	1680	4356	2669	3512	3042	2638	2840	3106	2807	2956

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 51,5; gatunku – 132,0; lata × gatunek – 45,1; technologii – 47,9; gatunek × technologia – 77,8; lata × technologia – 87,3; lata × gatunek × technologia – 317,0

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio



wynosiła: pszenica ozima – 2 046 zł · ha<sup>-1</sup>, żyto ozime – 850 zł · ha<sup>-1</sup>, rzepak ozimy – 2 577 zł · ha<sup>-1</sup>. Oznacza to, że rutwica wschodnia w badaniach własnych zapewniała ponad dwukrotnie większą wartość nadwyżki bezpośredniej niż pszenica ozima uprawiana na ziarno i aż ponad pięciokrotnie wyższą niż żyto ozime.



Fot. 6.5. Skoszona lucerna siewna na pokosach – ZPD Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Z badanych technologii istotnie wyższą wartość nadwyżki bezpośredniej uzyskano w technologii konwencjonalnej, a różnica ta w porównaniu z technologią integrowaną wynosiła prawie 11%. We wszystkich latach badań technologia konwencjonalna zapewniała istotnie wyższą (od 3 do 22%) nadwyżkę bezpośrednią niż technologia integrowana. Gatunki różniły się nadwyżką bezpośrednią pomiędzy technologiami produkcji. Rutwica wschodnia, tymotka łąkowa i kupkówka pospolita istotnie wyższą wartość nadwyżki bezpośredniej uzyskały w technologii integrowanej, a lucerna siewna oraz mieszanki lucerny siewnej z tymotką i koniczyny łąkowej z tymotką – w technologii konwencjonalnej (tab. 6.13).

Tabela 6.14

Dochód działalności bez dopłat [ $\text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] roślin energetycznych (ZPD Białyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio				
	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	I			
1	2926	3564	1588	1727	1658	1658	930	944	4236	1278	2757	2984	1664	2324	2206	1641	1923
2	2001	1851	4253	4501	4377	4377	1353	1196	2952	1763	2358	1581	1252	1417	2140	1906	2023
3	3725	3129	4146	4401	4274	4274	732	629	3218	2268	2743	2456	2600	2528	2352	2254	2303
4	2658	2398	2737	2644	2691	2691	225	95	2638	1142	1890	834	760	797	1453	1209	1331
x	2828	2736	3181	3318	3250	3250	810	716	3261	1613	2437	1964	1569	1766	2038	1753	1895

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 59,4; gatunku – 99,1; lata × gatunek – 112,4; technologii – 28,7; gatunek × technologia – 84,8; lata × technologia – 69,5; lata × gatunek × technologia – 397,0

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Tabela 6.15

Wskaźnik opłacalności produkcji roślin energetycznych [zł] (ZPD Bałczny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio		
	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	I	
1	2,30	2,81	1,79	1,98	1,25	1,37	1,43	1,50	2,78	1,66	2,27	1,86	2,07	1,97	1,86
2	1,90	1,95	3,07	3,45	1,45	1,34	1,53	1,86	2,23	1,89	1,68	1,62	1,65	1,98	2,02
3	2,71	2,62	3,07	3,48	1,02	1,25	1,27	1,46	2,35	2,13	2,05	2,31	2,18	2,08	2,21
4	2,14	2,17	2,27	2,38	0,94	1,05	0,99	1,11	2,03	1,54	1,33	1,36	1,34	1,62	1,60
x	2,26	2,39	2,55	2,83	1,17	1,25	1,30	1,48	2,35	1,80	1,83	1,79	1,81	1,91	1,92

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – r.n.; gatunku – 0,08; lata × gatunek – r.n.; technologii – r.n.; gatunek × technologia – r.n.; lata × technologia – 0,05; lata × gatunek × technologia – 0,18

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Gatunki różniły się dochodem z działalności bez dopłat. Najwyższy dochód bez dopłat zapewniała produkcja biomasy rutwicy wschodniej ( $3\ 250\ \text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Pozostałe gatunki charakteryzowały się dochodem istotnie niższym: od 14,4 do 87,1%. Najmniej opłacalna była produkcja biomasy tymotki łąkowej, a dochód z jej produkcji bez dopłat wynosił  $420\ \text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$  (tab. 6.14). Technologia konwencjonalna zapewniała istotnie wyższy dochód z produkcji biomasy ( $2\ 038\ \text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) niż technologia integrowana. We wszystkich latach badań w technologii konwencjonalnej uzyskiwano istotnie wyższy od 4,3 do 34,4% dochód z produkcji biomasy niż w technologii integrowanej. Trawy  $C_3$  (tymotka łąkowa i kupkówka pospolita) oraz rutwica wschodnia istotnie wyższy dochód bez dopłat uzyskały w technologii integrowanej. Lucerna siewna oraz mieszanki lucerny siewnej z tymotką i koniczyny łąkowej z tymotką istotnie wyższy dochód bez dopłat zapewniały natomiast w technologii konwencjonalnej (tab. 6.14).

Przy osiąganym w badaniach własnych poziomie plonów biomasy uzyskano wysokie wartości wskaźnika opłacalności produkcji. Najwyższy wskaźnik opłacalności ekonomicznej produkcji biomasy, obliczony jako stosunek wartości produkcji do poniesionych kosztów ogółem, zapewniała rutwica wschodnia (2,69). W porównaniu z rutwicą wschodnią opłacalność produkcji biomasy z pozostałych roślin była niższa od 10,5 do 55,0%. Najmniej opłacalna była uprawa tymotki łąkowej. Lata badań nie różnicowały wskaźnika opłacalności produkcji, chociaż różnica w wartościach wskaźnika między latami wahała się od 1,61 do 2,15 (tab. 6.15). Lata badań i gatunki kształtowały wskaźnik opłacalności produkcji biomasy badanych gatunków roślin energetycznych w sposób niezależny (interakcja nieistotna). W badaniach Gorzelanego i in. [108] wskaźnik efektywności ekonomicznej produkcji kukurydzy na kiszonkę wynosił 2,9 i był wyższy niż na ziarno o ponad 11%.

Tabela 6.16

Efektywność krańcowa konwencjonalnej technologii produkcji roślin energetycznych [zł]  
w latach badań

Lata badań	Lucerna siewna	Rutwica wschodnia	Tymotka łąkowa	Kupkówka pospolita	Lucerna siewna + tymotka łąkowa	Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa	Średnio
2009	-1,29	0,46	0,64	1,07	7,80	4,17	2,14
2010	1,55	-0,12	3,81	0,15	3,94	2,00	1,89
2011	3,38	-0,12	-0,02	0,40	3,55	0,59	1,30
2012	1,93	1,39	0,50	0,36	4,48	1,17	1,64
Średnio	1,39	0,40	1,23	0,49	4,94	1,98	1,74

Technologie nie różnicowały wskaźnika opłacalności produkcji biomasy. Najwyższą opłacalność ekonomiczną produkcji uzyskała rutwica wschodnia w technologii integrowanej (2,83). Najmniej opłacalna w uprawie była tymotka łąkowa w technologii konwencjonalnej (1,17). Ograniczenie nakładów przemysłowych środków produkcji na jej uprawę spowodowało nieznaczny wzrost wartości wskaźnika opłacalności ekonomicznej (tab. 6.15).



Fot. 6.8. Kiszenie biomasy w belach cylindrycznych owiniętych folią – ZPD Bałczyny 2012 (fot. A. Parzonka)

W produkcji rolniczej dodatkowe nakłady finansowe poniesione na agrotechnikę powinny być zrekompensowane wyższą plonem o wartość przewyższającą wielkość tego nakładu [105, 335]. Odzwierciedleniem tego jest wskaźnik efektywności krańcowej. W prezentowanych badaniach gatunki roślin różniły się krańcową efektywnością technologii konwencjonalnej (tab. 6.16).

W uprawie rutwicy wschodniej i kupkówki pospolitej krańcowa efektywność nakładów na technologię konwencjonalną była mniejsza od 1. Oznacza to, że dodatkowe nakłady na technologię konwencjonalną okazały się mało efektywne. Przyrost plonu wartościowo większy od dodatkowych kosztów produkcji uzyskano natomiast w uprawie pozostałych roślin. Największą krańcową efektywność nakładów w technologii konwencjonalnej uzyskała mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową (4,94). Oznacza to, że dodatkowe koszty poniesione na produkcję biomasy zwracały się prawie pięciokrotnie. U tymotki łąkowej i lucerny siewnej, gdzie wskaźniki krańcowej efektywności nakładów w technologii konwencjonalnej wynosiły odpowiednio 1,23 i 1,39, uzyskano przyrost plonu wartościowo zbliżony do dodatkowych kosztów produkcji.

## 7. Właściwości biomasy i biogazodochodowość

### 7.1 Trawy C<sub>4</sub>

Substratem wszystkich badanych gatunków była kiszonka sporządzona w zamkniętych pojemnikach z pociętej przez sieczkarnię biomasy całych roślin koszonych na wysokości około 20 cm nad powierzchnią gleby. Wszystkie kiszonki charakteryzowały się wysoką zawartością suchej masy, najwyższą u miskanta cukrowego (39,3%), a najniższą u sorga cukrowego (28,1%). Kiszonki z miskantów poprzez najmniejszą zawartość wody miały strukturę najmniej przefermentowanych, najbardziej rozluźnionych (tab. 7.1).

Plon kiszonek (mierzony w 4 miesiącu po zakiszeniu) był duży (tab. 7.1). Analogicznie jak przy plonie świeżej masy z 1 ha – wystąpiło zróżnicowanie w latach, także pomiędzy gatunkami i technologiami. Układ plonów miskanta olbrzymiego w latach dowodzi, że plon wzrastał jeszcze w 2011 roku (4 rok po posadzeniu rizomów). U miskanta cukrowego plon kiszonki w czwartym roku uprawy osiągnął najwyższy poziom. Średnio biorąc za trzy lata uprawy, plon kiszonki kukurydzy zwyczajnej był najwyższy (64,3 t · ha<sup>-1</sup>), sorga cukrowego niższy o 27%, miskanta olbrzymiego o 35%, miskanta cukrowego aż o 78%. Wystąpiła interakcja gatunku z technologią uprawy wyrażająca się korzystniejszym wpływem technologii średnionakładowej (integrowanej) na plon kiszonki sorga cukrowego oraz wyższym plonem kiszonek z obiektów konwencjonalnych (wysokonakładowych) obu gatunków miskantów. Plon kiszonki kukurydzy za lata 2010–2012 był taki sam w warunkach agrotechnicznych technologii konwencjonalnej (K) i integrowanej (I).

Wpływ technologii produkcji na zawartość popiołu był u poszczególnych gatunków zmienny (tab. 7.1). W kiszonce z miskanta olbrzymiego wyproduk-

Tabela 7.1

Właściwości substratu biomasy traw C<sub>4</sub> (ZPD Bałtyny 2010–2012)

Wyróżniki	Lata zbioru	Kukurydza zwycajna			Sorgo cukrowe			Miskant olbrzymi			Miskant cukrowy		
		K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio
Plon kiszonki (t · ha <sup>-1</sup> )	1	68,0	67,1	67,5	59,0	51,4	55,2	35,5	33,0	34,2	18,7	14,3	16,5
	2	NIR <sub>P-0,05</sub> : gatunek – 2,21; technologia – 1,50; gatunek × technologia – 3,05											
	3	70,2	64,2	67,2	57,2	50,8	54,0	51,2	47,6	49,4	14,5	12,0	13,2
Średnio	NIR <sub>P-0,05</sub> : gatunek – 2,51; technologia – 1,77; gatunek × technologia – r.n.												
	NIR <sub>P-0,05</sub> : gatunek – 1,37; technologia – 0,99; gatunek × technologia – 2,05												
	64,7	64,0	64,3	55,0	43,7	49,3	42,7	40,4	41,5	15,9	13,2	14,6	
Sucha masa (%)	NIR <sub>P-0,05</sub> : lata – 0,91, gatunek – 1,06, technologia – 0,59, lata × gatunek – 0,72, lata × technologia – r.n., gatunek × technologia – 1,22, lata × gatunek × technologia – 2,59												
	29,5	31,7	30,6	26,9	29,4	28,1	34,5	35,5	35,0	38,0	40,5	39,3	
	95,3	95,6	95,4	92,8	92,9	92,8	93,9	93,4	93,6	93,1	94,7	93,9	
pH	4,18	3,95	4,07	3,16	3,57	3,37	8,66	8,74	8,70	6,88	4,01	5,45	
Popiół (% s.m.)	4,8	4,5	4,6	7,3	7,1	7,2	5,7	6,2	5,9	6,9	5,4	6,1	
TC – węgiel ogólny (g/g s.m.)	0,442	0,460	0,451	0,447	0,435	0,441	0,436	0,458	0,447	0,430	0,439	0,435	
TOC – węgiel organiczny ogółem (g/g s.m.)	0,417	0,437	0,427	0,395	0,395	0,395	0,405	0,417	0,411	0,391	0,399	0,395	
TN – azot ogólny (g/g s.m.)	0,012	0,008	0,010	0,008	0,007	0,008	0,016	0,010	0,013	0,004	0,021	0,013	
ChZT – chemiczne zapotrzebowanie tlenu (gO <sub>2</sub> /g s.m.)	1,49	1,51	1,50	1,35	1,36	1,35	1,31	1,33	1,32	1,46	1,52	1,49	
Wartość energetyczna biometanu z 1 ha [GJ · ha <sup>-1</sup> ]	245,0	239,9	242,4	121,7	113,0	117,3	115,2	118,0	116,6	45,5	44,1	44,8	

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średnionakładowa (integrowana)

wanej według technologii integrowanej, zawartość popiołu była większa w porównaniu z substratem pochodzącym z produkcji konwencjonalnej. U pozostałych gatunków technologia integrowana miała korzystny, zmniejszający wpływ na zawartość popiołu w zakiszzonej biomacie. W niewielkim jednak stopniu przełożyło się to na poziom zawartości suchej masy organicznej kiszonki z różnych obiektów technologicznych. Zróżnicowanie było małe, statystycznie nieistotne (tab. 7.1).

Suchą masę organiczną substratów różnicował inny, gatunkowy poziom zawartości w nich popiołu – największy u sorga (7,2%) i miskanta cukrowego (6,1%) i wyraźnie najmniejszy, najkorzystniejszy (4,6%) w kiszonce z kukurydzy. Dlatego też wartość wyrażająca procentowy udział suchej masy organicznej jako wyróżnik biogazodochodowości był najkorzystniejszy u kukurydzy (najwyższy), nieco mniejszy u miskantów i najmniejszy u sorga. Zróżnicowanie to było regularnie powtarzalne w latach. W badaniach Księżaka i in. [196] zawartość popiołu w kiszonce kukurydzy zwyczajnej i sorga cukrowego wynosiła odpowiednio 5,3–6,3% i 5,8–7,0%. Udział części popielnych w kiszonce był w znacznym stopniu warunkowany przez poziom nawożenia azotem. Opierając się na europejskich wynikach badań [264, 352], należy stwierdzić, że zawartość popiołu w powietrznie suchej masie kukurydzy może wynosić od 5 do 15%. Według Stolarskiego i in. [316] zawartość popiołu w biomacie miskanta olbrzymiego wynosi około 3,9%, a miskanta cukrowego około 5,2%. Autorzy wykazali też istotną zależność między udziałem popiołu w biomacie traw energetycznych a terminem ich zbioru. W obu gatunkach miskantów zawartość popiołu wzrastała wraz z opóźnianiem zbioru roślin. W badaniach Kusia i Matyki [204] zawartość popiołu w miskancie olbrzymim wynosiła zaledwie 2,4%.

Zawartość węgla ogólnego w substratach kiszonkowych była mało zróżnicowana (poniżej 5%) zarówno przez gatunki, jak i intensywność technologii uprawy (tab. 7.1). Analiza wykazała, że udział węgla organicznego w całkowitym był najwyższy u kukurydzy i znacznie mniejszy u sorga cukrowego (89,6%) i miskanta cukrowego (90,8%). Wpływ samej technologii uprawy na relacje węgla ogólnego do organicznego był niewielki i nieregularny. Stolarski i in. [316] wskazują na znacznie niższe wartości tego parametru (47% – miskant olbrzymi, 49% – miskant cukrowy, 53% – wierzba).

Wskaźnik azotu ogólnego substratów z gatunków był mały i powtarzalnie zróżnicowany – najkorzystniejszy u sorga, następnie kukurydzy i wyraźnie gorszy w kiszonce z całych roślin miskanta olbrzymiego i cukrowego. Za wyjątkiem miskanta cukrowego u pozostałych trzech gatunków wartość N ogółem wykazywała wyższe (mniej korzystne) wartości w warunkach technologii z intensywnym nawożeniem NPK.

Należy odnotować bardzo duże zróżnicowanie odczynu pH kiszonek z poszczególnych gatunków traw C<sub>4</sub>. Najniższym odczynem charakteryzowała się





Fot. 7.1. Kwiatostan sorga cukrowego – badania własne, Bałcyny 2010 (fot. T. Sałek)

kiszonka z sorga ( $\text{pH} = 3,37$ ), a zdecydowanie najwyższą wartością  $\text{pH}$  – zakiszona masa miskanta olbrzymiego ( $\text{pH} = 8,70$ ). Wskaźniki chemicznego zapotrzebowania tlenu substratów kiszonkowych monogatunkowych należy ocenić jako niskie. Najkorzystniejszymi ich wartościami charakteryzowała się kiszonka z kukurydzy zwyczajnej oraz miskanta cukrowego, a około 12–13% niższymi – kiszonka z sorga cukrowego i miskanta olbrzymiego. Technologia o mniejszych nakładach na przemysłowe środki produkcji (integrowana)

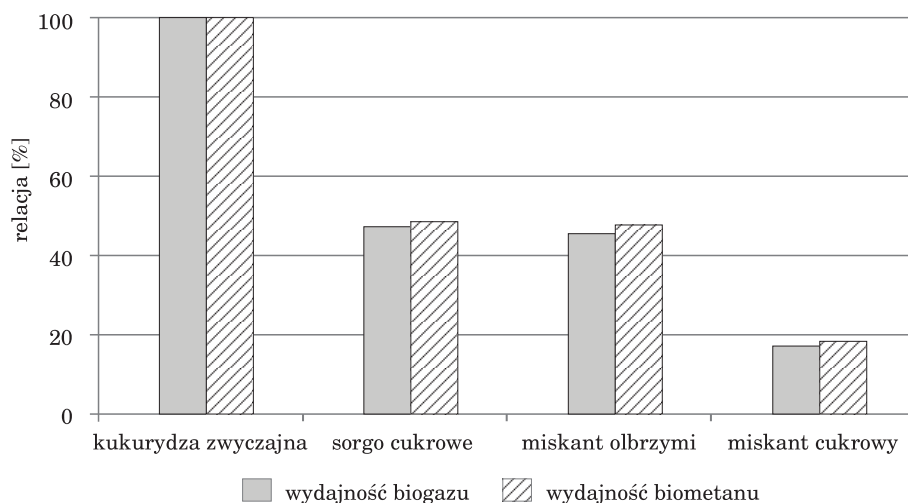
wykazywała tendencję do korzystniejszego wpływu na wartości chemicznego zapotrzebowania tlenu w porównaniu z uprawą intensywną nawozowo. Tendencja ta nie ma jednak silnego charakteru (tab. 7.1).

Na wydajność biogazu wpływa wiele czynników, m.in. – zmienność gatunkowa i odmianowa roślin, faza dojrzałości roślin podczas zbioru mierzona zawartością suchej masy, składników organicznych i popielnych, stopniem lignifikacji tkanek etc. Powyższe cechy roślin zależą od siedliskowych warunków wzrostu i rozwoju, poziomu stosowanych czynników agrotechnicznych (intensywność uprawy) oraz sposobu zbioru i konserwacji surowca – substratu do konwersji na biogaz [119, 167, 171, 299]. Według Strauša i in. [317] spośród grup roślin typu C<sub>3</sub> i C<sub>4</sub> największą potencjalną produktywnością biogazu odznacza się kukurydza zwyczajna. Natomiast sorgo cukrowe oraz inne trawy C<sub>4</sub> (miskanty) w aspekcie biogazodochodowości znacznie ustępują kukurydzy.

Wydajność biogazu z 1 kg suchej masy organicznej badanych gatunków w badaniach własnych należy określić jako zróżnicowaną i stosunkowo niską (tab. 7.2). To ostatnie określenie dotyczy przede wszystkim obu miskantów, tj. olbrzymiego i cukrowego, u których uzysk biogazu z jednostki suchej masy organicznej był aż o około 38% mniejszy w porównaniu z biomasą kukurydzy zwyczajnej. Czynnikiem zasadniczo różnicującym wydajność biogazu z hektara był plon suchej masy roślin przed i po zakiszeniu. Był on silnie zróżnicowany gatunkowo, w mniejszym stopniu przez technologie uprawy (tab. 7.2). Wpływ obu czynników agrotechnicznych (gatunek i technologia produkcji) był uwikłany w interakcję z warunkami siedliska, czyli lat.

W badaniach Klimiuk i in. [178] plon biogazu z kiszonki miskanta olbrzymiego i cukrowego był znacznie niższy w porównaniu z kukurydzą i sorgiem, tj. o 48,2 i 55,3%. Z dotychczasowych badań różnych autorów wynika, że z jednej tony suchej masy organicznej kiszonki z kukurydzy można uzyskać 450–700 m<sup>3</sup> biogazu o średniej zawartości metanu wynoszącej 50–55% [264, 352], a z kiszonki sorga cukrowego od 520 do 590 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m. o zawartości metanu 50–54% [243]. Według Grali i in. [116] z miskantów uzyskuje się znacznie mniejszą wydajność biogazu: 210–480 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m. z biomasy miskanta cukrowego i 250–550 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m. z biomasy miskanta olbrzymiego. Według Schattauera i Weilanda [299] wydajność biogazu z żyta ozimego uprawianego na kiszonkę z całych roślin wynosi od 550 do 680 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m.o. (50–55% CH<sub>4</sub>), natomiast z buraka cukrowego jest jeszcze większa – 800–860 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m.o. (z korzeni) i 550–600 m<sup>3</sup> · t<sup>-1</sup> s.m.o. (z liści). Zgodnie z powyższym dla średniego plonu suchej masy żyta (ziarno+słoma), wynoszącego 13–15 t · ha<sup>-1</sup>, potencjalny uzysk biogazu z 1 hektara wynosi odpowiednio 6 578–9 996 Nm<sup>3</sup>, a dla świeżej masy buraka cukrowego (korzenie + liście) wynoszącego 50–60 t · ha<sup>-1</sup> – 9 725–12 270 Nm<sup>3</sup>.

W badaniach własnych bezkonkurencyjnie najwyższy uzysk biogazu z 1 hektara zapewniała kukurydza zwyczajna (11,1 tys. Nm<sup>3</sup>). Uzysk biogazu z sorga cukrowego był mniejszy aż o 52%, z miskanta olbrzymiego – o 54%, a miskanta cukrowego – o 82% (rys. 7.1). Według Grali i in. [2011] za niższą wydajność biogazu z biomasy miskantów odpowiedzialna jest wysoka zawartość lignocelulozy i mniejsza zawartość skrobi.



Rys. 7.1. Ranking wydajności biogazu oraz metanu z biomasy traw C<sub>4</sub> (ZPD Balcyny)

Interakcja lata × gatunek (tab. 7.2) podkreśla wyższą wydajność miskanta olbrzymiego w plonie biogazu w stosunku do sorga cukrowego dopiero w dalszych (3 i 4) latach uprawy. Interakcja gatunku i technologii w niektórych latach uwypukla korzystniejszy uzysk biogazu w latach 2010 i 2011 z biomasy badanych gatunków uzyskanej w technologii wysokonakładowej (K). W 2012 roku przy wczesnym zbiorze roślin kukurydzy i obu miskantów (na skutek wczesnego zasychania) korzystniejszą wydajność biogazu zapewniała technologia integrowana – oszczędna nawozowo. Generalnie jednak różnicujący wpływ metody produkcji biomasy w ramach każdego gatunku na jej biogazodochodowość był mało znaczący.

Należy podkreślić dość zróżnicowaną dynamikę fermentacji mierzona czasem uzyskania 90% biogazu. Najkorzystniejszymi wartościami tej cechy substratu charakteryzowała się kukurydza zwyczajna oraz sorgo cukrowe (tab. 7.2). Zdecydowanie późniejsza, wolniejsza dynamika procesu fermentacji miała miejsce w fermentorach z substratami miskantów olbrzymiego i cukrowego.

Tabela 7.2

Wydajność biogazu (biogazodochodowość) i metanu z biomasy traw C<sub>4</sub> (ZPD Bałczyny 2010–2012)

Wyróżniki	Lata zbioru	Kukurudza zwycajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy					
		K	I	średnio	K	I	średnio	K	I	średnio			
(Ndm <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> s.m.o.)	średnio z 3 lat	620	571	596	523	527	525	370	367	369	356	389	373
	1	11 693	11 677	11 685	6 015	5 912	5 964	4 183	4 190	4 187	2 343	2 086	2 215
	2	12 069	11 163	11 616	5 830	5 838	5 834	6 040	6 041	6 041	1 811	1 746	1 779
(Nm <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup> )	3	9 613	10 547	10 080	4 988	3 309	4 149	4 878	5 144	5 011	1 830	1 949	1 890
	średnio	11 125	11 129	11 127	5 611	5 020	5 315	5 034	5 125	5 079	1 995	1 927	1 961
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : lata – 98, gatunek – 463, technologia – r.n., lata × gatunek – 255, lata × technologia – 63, gatunek × technologia – 297, lata × gatunek × technologia – 734												
Zawartość CH <sub>4</sub> (%) w biogazie	średnio z 3 lat	59	57	58	59	59	59	63	63	63	60	61	61
(Ndm <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> s.m.o.)	średnio z 3 lat	359	328	344	305	313	309	227	234	231	212	232	222
	1	6 866	6 711	6 789	3 479	3 547	3 513	2 552	2 573	2 563	1 424	1 272	1 348
	2	7 087	6 416	6 752	3 372	3 503	3 438	3 686	3 710	3 698	1 101	1 064	1 083
Wydajność metanu w biogazie (Nm <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup> )	3	5 645	6 061	5 853	2 885	1 985	2 435	2 977	3 159	3 068	1 112	1 188	1 150
	średnio	6 533	6 396	6 464	3 245	3 012	3 129	3 072	3 147	3 109	1 212	1 175	1 194
	NIR <sub>(P=0,05)</sub> : lata – 59, gatunek – 276, technologia – r.n., lata × gatunek – 161, lata × technologia – 41, gatunek × technologia – 189, lata × gatunek × technologia – 453												
Całkowity czas fermentacji (liczba dni)	średnio z 3 lat	41	41	41	41	41	41	40	40	40	40	40	40
Czas uzyskania 90% biogazu		17	14	15	17	17	17	24	24	24	27	23	25

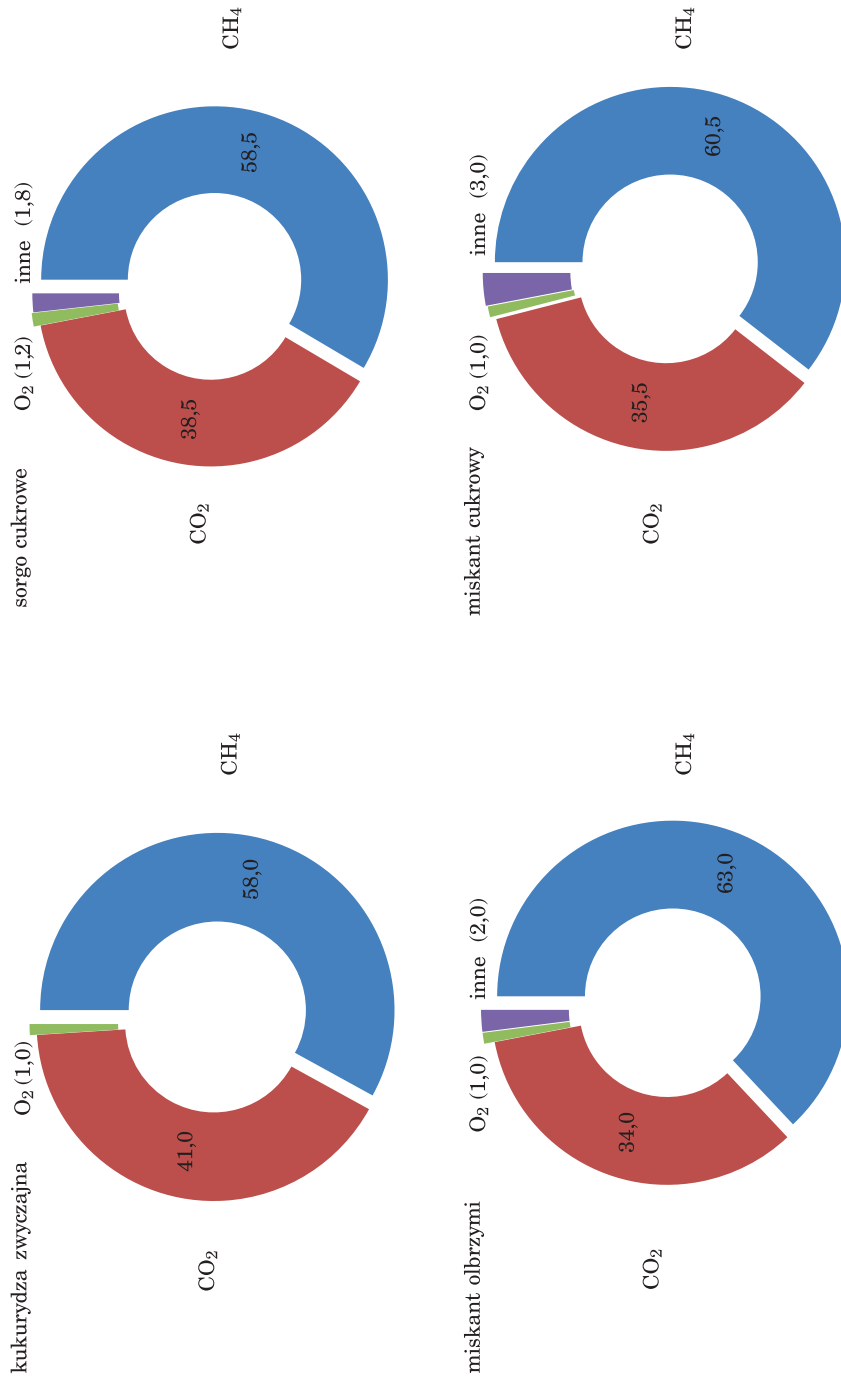
K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średnionakładowa (integrowana)



Fot. 7.2. Kukurydza zwyczajna w badaniach własnych – Bałcyny 2011 (fot. T. Sałek)

Najwyższą zawartością  $\text{CH}_4$  charakteryzował się biogaz z kiszonki miskanta olbrzymiego (średnio 63%) oraz miskanta cukrowego (średnio 61%), najniższą – z kukurydzy zwyczajnej (średnio 58%) (rys. 7.2). Otrzymane wyniki znajdują poparcie w literaturze. Zdaniem wielu autorów [130, 264, 314, 352] udział metanu z biogazie rolniczym z kukurydzy może wynosić od 50 do nawet 85% (średnio 50–60%), z sorga cukrowego od 51% [217] do 58% [15]. Biogaz z miskanta cukrowego zawiera od 76 do 80%, a olbrzymiego – od 54 do 65% metanu [116]. Oprócz głównego składnika, jakim jest metan (średnio dla biomasy – 50–75% udziału), w skład biogazu wchodzi również ditlenek węgla (25–45%) oraz siarkowodór, azot, tlen i wodór [201].

W badaniach własnych metan to oczywiście główna składowa biogazu (rys. 7.2). Ditlenek węgla stanowił 39–41% fazy gazowej powstałej z sorga

Rys. 7.2. Udział gazów w objętości fazy gazowej uzyskanej z biomasy traw C<sub>4</sub> (średnio 2010–2012)

i kukurydzy i 34–35% objętości biogazu powstałego z biomasy miskantów – olbrzymiego i cukrowego. Niewielki (1–1,3%) udział w biogazie miał  $O_2$  (mało różnicowany przez gatunek traw  $C_4$ ). W fazie gazowej uzyskanej z biomasy miskanta cukrowego 3% stanowiły inne związki (para wodna,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  i inne związki lotne). Wpływ technologii produkcji biomasy poszczególnych gatunków nie wpływał znacząco na skład biogazu (pominięto tę cechę w tabeli).

Zróżnicowanie składu biogazu uzyskanego z różnych kiszzonek w niewielkim stopniu zmieniło relacje plonu metanu w stosunku do biogazu ogółem w poszczególnych kombinacjach gatunkowych i technologicznych. Najkorzystniejszą wydajność metanu uzyskano z kiszonki sporządzonej z kukurydzy uprawianej intensywnie, konwencjonalnie przy użyciu dużych dawek nawozów. Tendencja do obniżki wydajności z hektara pod wpływem technologii integrowanej była mniejsza od prognozy istotności statystycznej. Sorgo cukrowe i miskant olbrzymi zapewniały statystycznie taki sam poziom plonu  $CH_4$ , był on niższy w stosunku do kukurydzy o około 52%. Uzysk metanu w biogazie z kiszonki sporządzonej z roślin miskanta cukrowego stanowił tylko 18% w stosunku do plonu uzyskanego z kukurydzy. Mały wpływ technologii uprawy na wydajność metanu z jednostki powierzchni wyrażał się wyłącznie tendencją do korzystniejszej wartości tej cechy w przypadku technologii K (u kukurydzy i sorga) bądź technologii I (u obydwu gatunków miskanta).

Zawartość metanu w 1 kg suchej masy organicznej była najwyższa u kukurydzy (średnio  $344 \text{ Ndm}^3$ ), a o 10% mniejsza u sorga. Istotnie mniejszą (około 64%) wydajność metanu w biogazie notowano u obu gatunków miskantów. Z literatury [4, 217, 238, 239, 268] wynika, że z 1 kg suchej masy organicznej kukurydzy można uzyskać  $268\text{--}397 \text{ Ndm}^3$ . Wartość ta jest uzależniona od odmiany, terminu zbioru oraz sezonu wegetacyjnego [167]. Badania niemieckie [131] dowodzą, że jednostkowa wydajność metanu w biogazie z kukurydzy może wynosić nawet  $480\text{--}745 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  Potencjał metanogenności traw z rodzaju *Miscanthus* szacuje się na poziomie około  $410 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.}$  [113]. Natomiast badania Klimiuk i in. [178] dowodzą, że z uwagi na wyższą zawartość ligniny, wartości te są niższe, odpowiednio  $100 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.}$  dla miskanta olbrzymiego i  $190 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.}$  cukrowego.

Wydajność metanu z hektara jest wypadkową jego zawartości jednostkowej w biogazie oraz wolumenu biogazu z jednostki powierzchni. Zdecydowany, różnicujący wpływ przypada oczywiście na plon biogazu (tab. 7.2). Zdecydowanie największą wydajność zapewniała kukurydza zwyczajna, drugie w rankingu sorgo cukrowe zapewniało tylko 46% wolumenu w stosunku do kukurydzy. Na tym samym statystycznie poziomie wydajności metanu był miskant olbrzymi. Drugi z miskantów – cukrowy – wobec niskiego plonu biogazu zapewniał wydajność metanu na poziomie  $1\,195 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Liczne badania [167, 168, 268] dowodzą, że z biomasy uzyskanej z 1 ha kukurydzy, w zależno-

ści od plonu i zawartości w nim suchej masy, można wyprodukować od 5 700 do 10 200 m<sup>3</sup> metanu. Plon metanu z obu miskantów jest zwykle niższy (2 000–5 000 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>), co potwierdzają badania Klimiuk i in. [178].

Rodzaj zastosowanej technologii nie różnicował wydajności metanu w układzie średnich wyników z 3 lat. Wystąpiła jednak interakcja gatunku z technologią, która dowodzi wyższości metody konwencjonalnej nad integrowaną u kukurydzy i sorga oraz braku związku poziomu agrotechniki z wydajnością metanu u pozostałych badanych taksonów.



Fot. 7.4. Przygotowanie przymy kiszonki z kukurydzy – Bałcyny 2011 (fot. T. Sałek)

Wartość opałowa biogazu uzyskanego z 1 kg suchej masy organicznej wynosi około 16,8–27,0 MJ · m<sup>3</sup> [207, 333]. Według Podkówki i Podkówki [268] uśredniona wartość energetyczna 1 m<sup>3</sup> metanu to około 37,5 MJ.

Wartość energetyczna metanu uzyskanego w biogazie z 1 ha (tab. 7.3) powstała z przeliczenia jego wydajności i kaloryczności. Trendy w kształtowaniu tych wartości są podobne do tych, jakie wystąpiły w wydajności tego gazu. Największą wartość energetyczną plonu tego gazu zapewniała kukurydza (242,4 GJ), mniejszą (o około 52%) – sorgo cukrowe i miskant olbrzymi, a najmniejszą (o 82%) – miskant cukrowy. Zróżnicowanie tego wolumenu przez poziom technologii było małe i wynosiło od 2 do 4% (było nieistotne statystycznie). Według Michalskiego [231] uzysk energii w metanie z hektara uprawy kukurydzy jest mniejszy – 101–204 GJ.



Tabela 7.3

Wyróżniki biogazu z biomasy traw C<sub>1</sub> (ZPD Bałczyny 2010–2012)

Wyróżniki	Kukurydza zwyczajna		Sorgo cukrowe		Miskant olbrzymi		Miskant cukrowy	
	K	I	K	I	K	I	K	I
Wartość energetyczna metanu z 1 ha [GJ · ha <sup>-1</sup> ]	245,0	239,9	121,7	113,0	115,2	118,0	45,5	44,1
Koszt produkcji surowca do wytworzenia 1 m <sup>3</sup> biogazu (zł · Nm <sup>-3</sup> )	0,29	0,24	0,51	0,51	0,45	0,39	1,14	1,01
Koszt produkcji surowca do wytworzenia 1 m <sup>3</sup> metanu w biogazie (zł · Nm <sup>-3</sup> )	0,49	0,42	0,87	0,84	0,73	0,64	1,87	1,77

K – technologia wysokonakładowa (konwencjonalna), I – technologia średnionakładowa (integrowana)

W niniejszych badaniach (wykonanych w skali półtechnicznej) koszt wyprodukowania substratu kukurydzy do wytworzenia 1 m<sup>3</sup> biogazu wynosił 0,29 zł w technologii wysokonakładowej i 0,24 zł w technologii o zmniejszonym poziomie nawożenia. Tak wyliczone koszty produkcji metanu (w biogazie) wzrosły odpowiednio do 0,49 i 0,42 zł · m<sup>-3</sup> (tab. 7.3).

Koszty wyprodukowania substratu do wytworzenia 1 Nm<sup>3</sup> biogazu z sorga i miskanta olbrzymiego wzrosły do 0,51 i 0,42 zł czyli odpowiednio 1,9- i 1,2-krotnie. Metoda produkcji biomasy jako substratu nie różnicowała znacząco kosztów produkcji biomasy niezbędnej do wytworzenia 1 Nm<sup>3</sup> biogazu. Wyliczony i podany w tabeli 7.3 koszt produkcji surowca niezbędnego do wytworzenia jednostki objętości (1 Nm<sup>3</sup>) metanu był pochodną kosztu jednostkowego produkcji biomasy i zawartości metanu w biogazie. Dlatego najkorzystniejsze (czyli najniższe) wartości uzyskano u kukurydzy, następnie miskanta olbrzymiego i sorgo. Wzrost tak wyliczonego kosztu był duży – odpowiednio o 50 i 86% (tab. 7.3).

Plątek [264] wskazuje na sposób oszacowania kosztu wyprodukowania 1 m<sup>3</sup> biogazu z biomasy kukurydzy jako produktu finalnego. Autor dodatkowo sumuje nakłady finansowe na obsługę biogazowni i standaryzację biogazu. Przy cenie 1 m<sup>3</sup> biogazu 0,41 zł i zawartości metanu w biogazie 53% oraz koszcie standaryzacji na 1 m<sup>3</sup> – 0,2 zł gazu oczyszczonego, koszt 1 m<sup>3</sup> metanu oscyluje około 0,97 zł.

## 7.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C<sub>3</sub>

Badania kiszonki jako substraty do produkcji biogazu różniły się wyraźnie parametrami chemicznymi (tab. 7.4). Największą wydajnością jednostkową biogazu charakteryzowała się kiszonka z mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową (486 Ndm<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup> s.m.o.). Wydajność biogazu z 1 kg s.m.o. kiszonek pozostałych gatunków roślin energetycznych była mniejsza od 4% (kupkówka pospolita) do 29% (lucerna siewna) (tab. 7.5). Zróżnicowana wydajność jednostkowa biogazu może wynikać z różnic w zawartości suchej masy, a w niej poszczególnych składników chemicznych (tab. 7.4). Wzrost zawartości suchej masy w kiszonce powyżej określonego poziomu powoduje spadek wydajności biogazu i zawartego w nim metanu (lignifikacja ścian komórkowych roślin). Z tego względu opóźnianie terminu zbioru substratów i wzrost w nich zawartości suchej masy pogarsza wynik wydajności biogazu i metanu w biogazie [167].

Średnia wydajność jednostkowa biogazu z kiszonki uzyskanej w technologii integrowanej była wyższa o 20% niż z technologii konwencjonalnej. W technologii integrowanej wydajność jednostkowa biogazu wynosiła 453 Ndm<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup> s.m.o., a zawartość w nim metanu 55,2%. Z kiszonki uzyskanej w technologii konwencjonalnej wydajność jednostkowa biogazu wynosiła 416 Ndm<sup>3</sup> · kg<sup>-1</sup> s.m.o., czyli była mniejsza o 8% niż w technologii integrowanej (tab. 7.5).

Tabela 7.4

Parametry substratu do produkcji biogazu roślin energetycznych (2010–2011)

Wyróżniki	Lucerna siewna			Rutwica wschodnia			Tymotka łąkowa			Kupkówka pospolita			Lucerna siewna + tymotka łąkowa			Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		
	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x
Sucha masa (%)	18,9	18,5	18,7	22,1	20,7	21,4	23,5	23,6	23,6	20,0	17,2	18,6	22,5	24,5	23,5	22,9	27,0	25,0
Sucha masa organiczna (% s.m.)	88,0	87,8	87,9	90,4	91,2	90,8	89,9	92,2	91,1	90,1	89,2	89,7	91,3	92,4	91,9	88,3	90,1	89,2
Popiół (%)	12,0	11,2	11,6	9,6	8,8	9,2	10,1	7,8	9,0	9,9	10,8	10,4	8,7	7,6	8,2	11,7	9,9	10,8
TC – Węgiel całkowity (g/g s.m.)	0,417	0,420	0,419	0,412	0,419	0,416	0,451	0,433	0,442	0,432	0,435	0,434	0,447	0,442	0,445	0,445	0,425	0,435
TOC – Węgiel organiczny (g/g s.m.)	0,367	0,368	0,368	0,368	0,382	0,375	0,401	0,398	0,400	0,396	0,396	0,396	0,408	0,407	0,408	0,389	0,382	0,386
TN – Azot całkowity (g/g s.m.)	0,009	0,010	0,010	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,005	0,006	0,006	0,100	0,011	0,056	0,007	0,006	0,007
ChZT – Chemiczne zapotrzebowanie tlenu (gO <sub>2</sub> /g s.m.)	1,856	1,775	1,816	1,636	1,532	1,584	1,124	1,128	1,126	1,673	1,260	1,467	1,233	1,247	1,235	1,322	1,340	1,331

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Wydajność biogazu z kiszonki lucerny siewnej uzyskanej w technologii integrowanej wynosiła  $367 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  i była większa niż w technologii konwencjonalnej o 12%. Z kiszonki rutwicy wschodniej w technologii integrowanej uzyskano wydajność jednostkową biogazu wynoszącą  $485 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , co oznacza większą o 15% jego wydajność niż w technologii konwencjonalnej (tab. 7.5). Wydajność biogazu z kiszonki tymotki łąkowej uzyskanej w technologii integrowanej ( $418 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ ) była większa o 14% niż w technologii konwencjonalnej. Kiszonka z kupkówki pospolitej pochodząca z technologii integrowanej zapewniała uzysk jednostkowy biogazu wynoszący  $506 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , który był większy o 17% niż w technologii konwencjonalnej.

Kaiser [167], badając wydajność biogazu z kiszonki koniczyny łąkowej i lucerny, wykazał, że zakres zmienności wydajności biogazu z tych roślin wahał się od 390 do  $714 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  Gradziuk [112], Szlachta [333] oraz Fugol i Prask [89] podają, że wydajność biogazu z 1 tony suchej masy organicznej lucerny oscyluje od 440 do  $645 \text{ m}^3$ . W przypadku traw wydajność jednostkowa biogazu z 1 tony suchej masy organicznej może wynosić od 520 do  $640 \text{ m}^3$  [112, 299]. Jego wydajność zależy od gatunku traw i może się wahać od  $400 \text{ m}^3$  (mozga trzcinowata) do ponad  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  (kupkówka pospolita, tymotka łąkowa, życica wielokwiatowa) [119]. W badaniach Golińskiego i Joksia [103] wydajność biogazu z 1 tony suchej masy traw, w zależności od ich gatunku, wynosiła od  $378 \text{ m}^3$  (kostrzewa trzcinowa) do  $473 \text{ m}^3$  (życica wielokwiatowa). W badaniach Kaisera [167] wydajność biogazu z kiszonki różnych gatunków życicy wynosiła od 477 do  $846 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , a z innych traw od 443 do  $711 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$

W prezentowanych badaniach zawartość metanu w biogazie była dość wysoka (tab. 7.5), a badane gatunki nie różnicowały wyraźnie zawartości  $\text{CH}_4$  (od 55,2 do 56,2%) w biogazie. Z danych literaturowych wynika, że udział  $\text{CH}_4$  w biogazie z fitomasy traw wynosi w zależności od gatunku – od 49,6% (życica wielokwiatowa) do 53,4% – tymotka łąkowa [119], a z lucerny – od 64 do 73% [89, 333]. W badaniach własnych wydajność jednostkowa metanu z kiszonki badanych gatunków roślin wynosiła od 195 do  $269 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  Największą wydajność jednostkową metanu zapewniała kiszonka z mieszanki lucerny siewnej z tymotką, a najmniejszą – z lucerny siewnej (tab. 7.5). Technologie produkcji biomasy różniły się wydajnością jednostkową metanu (tab. 7.5). W technologii integrowanej średnia wydajność metanu wynosiła  $250 \text{ Ndm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  i była większa o 18% niż w technologii konwencjonalnej, przy czym wystąpiła wyraźna interakcja gatunku z technologią.

Mikołajczak i in. [233] na podstawie badań innych autorów podają, że z pierwszego pokosu traw największą wydajność metanu można uzyskać z fermentacji 1 tony suchej masy kostrzewy czerwonej –  $456 \text{ m}^3$ , kostrzewy



łąkowej – 401 m<sup>3</sup> czy życicy trwałej – 398 m<sup>3</sup>, a wyraźnie mniejszą – z kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej – po 366 m<sup>3</sup>, wyczyńca łąkowego – 338 m<sup>3</sup> i kostrzewy trzcinowej – 329 m<sup>3</sup>.

W latach badań ze względu na różnice w plonowaniu roślin wydajność biogazu z 1 ha była istotnie zróżnicowana. Największą jego wydajność, ze względu na najwyższe plony suchej masy, uzyskano w 2011 roku (4 110 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>). W pozostałych latach badań wydajności biogazu były istotnie mniejsze (2010 – 3 982 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>, 2009 – 3 827 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>, 2012 – 3 340 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>). W porównaniu z wydajnością uzyskaną w 2011 roku różnice w biogazodochodowości wynosiły od 3 do 19% (tab. 7.6).

Największą biogazodochodowość uzyskano w plonie suchej masy organicznej mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową (5 384 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>). Pozostałe gatunki cechowały się istotnie mniejszą jego wydajnością. W porównaniu z mieszanką lucerny siewnej z tymotką biogazodochodowość rutwicy wschodniej była mniejsza o 8%, mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką – o 9%, lucerny siewnej – o 43%, kupkówki pospolitej – o 52%, a tymotki łąkowej aż o 53% (tab. 7.6). Gatunki różniły się też biogazodochodowością w latach badań. Zróżnicowanie to mieściło się w przedziale od 2 do 13% (tab. 7.6).

Biogazodochodowość biomasy uzyskanej w technologii integrowanej (3 711 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>) była mniejsza niż w technologii konwencjonalnej (3 918 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>), a różnica była istotna i wynosiła 5%. Zależność taką stwierdzono również w latach 2009, 2010 i 2012, czyli w latach, w których uzyskano istotnie niższe plony biomasy. Natomiast w 2011 roku wyższą biogazodochodowość uzyskano w technologii integrowanej. Wydajność biogazu zależała od gatunku i stosowanej technologii produkcji biomasy. U lucerny siewnej, tymotki łąkowej i mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką biogazodochodowość biomasy z technologii integrowanej była statystycznie podobna jak w technologii konwencjonalnej, a różnica ta nie przekraczała 2–4% (tab. 7.6). Z 1 ha biomasy rutwicy wschodniej uzyskanej w technologii integrowanej wydajność biogazu była większa o 12% niż w technologii konwencjonalnej (różnica istotna). Z kolei mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową w technologii integrowanej uzyskała wydajność biogazu istotnie mniejszą o 29% niż w technologii konwencjonalnej. Kupkówka pospolita w technologii konwencjonalnej charakteryzowała się istotnie wyższą o prawie 8% biogazodochodowością niż w technologii integrowanej (tab. 7.6).

Analizowane w badaniach gatunki roślin energetycznych nie dorównywały kukurydzy pod względem biogazodochodowości. Jedynie mieszanka lucerny siewnej z tymotką uzyskała biogazodochodowość (5 384 Nm<sup>3</sup> · ha<sup>-1</sup>) zbliżoną do dolnej granicy wydajności biogazu z kukurydzy podawanej w literaturze.

Tabela 7.6

Wydajność biogazu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{s.m.o.}$ ] z roślin energetycznych (ZPD Bałecny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio						
	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x					
1	3122	3642	3198	3547	2747	2837	2792	3104	2694	2899	7335	3956	5646	5309	4436	4873	3519	3827	
2	2546	2499	5604	6452	3252	3237	3244	2895	2833	2864	5928	4608	5268	3901	4025	3963	4021	3982	
3	3561	3328	5460	6287	1938	2210	2074	2390	2252	2321	6208	5249	5728	4771	5660	5215	4055	4110	
4	3013	2931	4341	4637	1946	1982	1964	2336	2190	2263	5768	4022	4895	3363	3547	3455	3461	3340	
x	3061	3100	4651	5231	2471	2566	2519	2681	2492	2587	6310	4459	5384	4336	4417	4377	3918	3711	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 87,5; gatunku – 171,0; lata × gatunek – 131,0; technologii – 38,2; gatunek × technologia – 103,0; lata × technologia – 65,7; lata × gatunek × technologia – 219,0

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Tabela 7.7

Wydajność metanu [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{s.m.o.}$ ] z roślin energetycznych (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio							
	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	x	K	I						
1	1751	2042	1757	1949	1853	1514	1563	1538	1765	1475	1620	4090	2160	3125	3018	2467	2742	2316	1943	2129
2	1429	1401	3079	3545	3312	1792	1784	1788	1646	1551	1599	3305	2516	2911	2218	2238	2228	2245	2173	2209
3	1998	1866	3000	3455	3227	1068	1217	1143	1359	1233	1296	3461	2866	3163	2712	3147	2929	2266	2297	2282
4	1691	1643	2385	2548	2467	1072	1092	1082	1328	1199	1264	3216	2196	2706	1912	1972	1942	1934	1775	1855
x	1717	1738	2555	2874	2715	1361	1414	1388	1525	1365	1445	3518	2435	2976	2465	2456	2460	2190	2047	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 52,5; gatunku – 99,4; lata × gatunek – 70,1; technologii – 24,7; gatunek × technologia – 62,8; lata × technologia – 33,3; lata × gatunek × technologia – 117,0

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio



Największą wydajność metanu uzyskano z plonu suchej masy organicznej mieszanki lucerny siewnej z tymotką ( $2\,976\text{ Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  s.m.o.). U pozostałych gatunków roślin uzysk metanu był istotnie mniejszy od 9% – rutwica wschodnia aż do 53% – tymotka łąkowa. Wydajność metanu była zróżnicowana w latach badań od 3 do 19% i statystycznie istotna (tab. 7.7). Technologie produkcji biomasy (konwencjonalna i integrowana) różnicowały dość wyraźnie wydajność metanu. W technologii konwencjonalnej jego wydajność wynosiła  $2\,190\text{ Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , a w technologii integrowanej  $2\,047\text{ Nm}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Różnica na niekorzyść technologii integrowanej wynosiła 7% i była statystycznie istotna (tab. 7.7).

Wystąpiła także interakcja gatunku z technologią. Lucerna siewna, tymotka łąkowa i mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką łąkową uzyskały w technologii integrowanej podobną wydajność metanu jak w technologii konwencjonalnej. Wydajność metanu z 1 kg biomasy rutwicy wschodniej w technologii integrowanej była istotnie większa (o 12%) niż w technologii konwencjonalnej. Natomiast wydajność metanu z mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową była w technologii integrowanej istotnie mniejsza o 31%, a z kupkówki pospolitej – o 11% niż w technologii konwencjonalnej (tab. 7.7).

Kalac [168] podaje, że najwyższy potencjalny plon metanu z biomasy mieszanki koniczyny łąkowej z tymotką wynosi  $5\,400\text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , a z traw od  $3\,200$  do  $3\,500\text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Na ilość uzyskiwanego metanu z porostu traw, oprócz cech gatunkowych roślin, wpływ wywiera też ich faza rozwojowa podczas zbioru [351].

Koszt produkcji  $1\text{ Nm}^3$  biogazu (w rachunku – bez dopłat) w zależności od gatunku roślin, wahał się od 0,42 do 0,79 zł. Najniższym kosztem produkcji  $1\text{ Nm}^3$  biogazu charakteryzowała się rutwica wschodnia i mieszanka lucerny siewnej z tymotką łąkową (0,42 zł), a istotnie najwyższym – tymotka łąkowa (0,79 zł) (tab. 7.7). W latach badań koszty produkcji  $1\text{ Nm}^3$  biogazu wahały się od 0,55 do 0,72 zł. Najniższy jednostkowy koszt produkcji biogazu uzyskano w 2011 roku ( $0,55\text{ zł} \cdot \text{Nm}^3$ ), a najwyższy w 2012 roku ( $0,72\text{ zł} \cdot \text{Nm}^3$ ). W 2011 roku najtaniej produkowano  $1\text{ Nm}^3$  biogazu z rutwicy wschodniej (0,32 zł), a najdrożej z tymotki łąkowej (0,84 zł). W 2012 roku, w którym koszty produkcji biomasy były najwyższe, a plony najniższe w 4-letnim cyklu badań, najtaniej produkowano  $1\text{ Nm}^3$  biogazu z rutwicy (0,45 zł), a najdrożej z kupkówki pospolitej (0,99 zł). Były to koszty znacznie wyższe od uzyskanych z kukurydzy w niniejszych badaniach.

W technologii integrowanej koszt produkcji  $1\text{ Nm}^3$  biogazu wynosił 0,56 zł i był istotnie mniejszy od technologii konwencjonalnej o 0,08 zł (13%). U większości badanych gatunków roślin koszty produkcji  $1\text{ Nm}^3$  biogazu w technologii integrowanej były istotnie niższe (kupkówka pospolita – o 11%, lucerna siewna – o 12%, mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką

Tabela 7.8

Koszt produkcji surowca do wytworzenia 1 Nm<sup>3</sup> biogazu [zł] (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio				
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I			
1	0,72	0,54	0,63	0,50	0,80	0,64	0,72	0,69	0,32	0,49	0,41	0,44	0,43	0,44	0,61	0,55	0,58
2	0,87	0,78	0,37	0,28	0,69	0,66	0,67	0,56	0,40	0,43	0,42	0,60	0,50	0,55	0,60	0,53	0,57
3	0,61	0,58	0,37	0,28	0,98	0,70	0,84	0,71	0,38	0,38	0,38	0,49	0,35	0,42	0,61	0,50	0,55
4	0,78	0,70	0,50	0,41	1,06	0,84	0,95	0,93	0,44	0,53	0,49	0,76	0,60	0,68	0,76	0,67	0,72
x	0,74	0,65	0,46	0,37	0,88	0,71	0,79	0,72	0,39	0,46	0,42	0,57	0,47	0,52	0,64	0,56	–

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,012; gatunku – 0,027; lata × gatunek – 0,013; technologii – 0,006; gatunek × technologia – 0,014; lata × technologia – 0,006; lata × gatunek × technologia – 0,043

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

łąkową – o 18%, tymotka łąkowa – o 19%, rutwica wschodnia – o 20%) niż w technologii konwencjonalnej. Tylko mieszanka lucerny siewnej z tymotką w technologii konwencjonalnej zapewniała istotnie niższy (o 15%) koszt produkcji 1 Nm<sup>3</sup> biogazu niż w technologii integrowanej (tab. 7.8).



Fot. 7.5. Zgrabianie podsuszanej biomasy traw na wałki — ZPD Bałcyny 2012 (fot. A. Parzonka)

Średnio za 4 lata najtaniej produkowano 1 Nm<sup>3</sup> metanu z rutwicy wschodniej (0,76 zł) i mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową (0,77 zł). Koszty produkcji metanu z pozostałych roślin energetycznych były istotnie większe od 0,16 do 0,68 zł (od 21 do 89%). Były one zróżnicowane (1,0–1,29 zł) w latach, analogicznie do różnic w plonie biomasy. Badane technologie również różnicowały koszty produkcji 1 Nm<sup>3</sup> metanu (tab. 7.9). W technologii integrowanej jednostkowe koszty produkcji metanu wynosiły średnio z 4 lat 1,02 zł i były istotnie mniejsze (o ponad 11%) niż w technologii konwencjonalnej. W latach badań różnice w jednostkowych kosztach produkcji metanu w technologii integrowanej były istotnie mniejsze od 9 do 16% niż w technologii wysokonakładowej.

Wartość energetyczna metanu uzyskana z 1 hektara, w zależności od gatunku, wahała się od 90 do 192 GJ (tab. 7.10). Największą wartość energetyczną metanu uzyskano w plonie mieszanki lucerny siewnej z tymotką łąkową.

Tabela 7.9

Koszt produkcji surowca do wytworzenia 1 Nm<sup>3</sup> metanu [zł] (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna			Rutwica wschodnia			Tymotka łąkowa			Kupkówka pospolita			Lucerna siewna + tymotka łąkowa			Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa			Średnio		
	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x	K	I	x
1	1,28	0,97	1,12	1,15	0,90	1,02	1,45	1,16	1,31	1,27	1,26	1,26	0,58	0,90	0,74	0,78	0,78	0,78	0,78	0,99	1,04
2	1,55	1,39	1,47	0,67	0,52	0,59	1,25	1,19	1,22	1,18	1,02	1,10	0,72	0,79	0,76	1,05	0,90	0,97	1,07	0,97	1,02
3	1,09	1,03	1,06	0,67	0,51	0,59	1,77	1,27	1,52	1,43	1,29	1,36	0,69	0,70	0,69	0,86	0,63	0,74	1,08	0,91	1,00
4	1,38	1,25	1,32	0,90	0,75	0,83	1,92	1,52	1,72	1,84	1,70	1,77	0,80	0,97	0,88	1,33	1,07	1,20	1,36	1,21	1,29
x	1,33	1,16	1,24	0,85	0,67	0,76	1,60	1,29	1,44	1,43	1,32	1,37	0,70	0,84	0,77	1,00	0,84	0,92	1,15	1,02	-

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 0,020; gatunku – 0,051; lata × gatunek – 0,023; technologii – 0,011; gatunek × technologia – 0,025; lata × technologia – 0,012; lata × gatunek × technologia – 0,078

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Tabela 7.10

Wartość energetyczna metanu z 1 ha [GJ · ha<sup>-1</sup>] (ZPD Bałczyny 2009–2012)

Lata badań	Lucerna siewna		Rutwica wschodnia		Tymotka łąkowa		Kupkówka pospolita		Lucerna siewna + tymotka łąkowa		Koniczyna łąkowa + tymotka łąkowa		Średnio					
	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I	K	I				
1	111	130	114	127	98	101	100	96	103	262	141	202	190	158	174	148	126	137
2	91	89	200	230	116	116	116	103	101	212	165	188	139	144	141	144	141	142
3	127	119	195	224	69	79	74	85	80	222	187	205	170	202	186	145	149	147
4	108	105	155	166	69	71	70	83	78	206	144	175	120	127	123	124	115	119
x	109	111	166	187	88	92	90	96	89	225	159	192	155	158	156	140	132	-

NIR<sub>0,05</sub> dla: lat – 5,87; gatunku – 7,64; lata × gatunek – 6,08; technologii – 3,15; gatunek × technologia – 3,98; lata × technologia – 7,24; lata × gatunek × technologia – 9,23

K – technologia konwencjonalna, I – technologia integrowana, x – średnio

Pozostałe gatunki roślin energetycznych dostarczały w postaci metanu istotnie mniej energii od 8% (rutwica wschodnia) do 53% (tymotka łąkowa). Z porównania lat badań wynika, że statystycznie najwięcej energii w metanie uzyskano z biomasy wyprodukowanej w latach 2010 i 2011 (odpowiednio 142 i 147 GJ · ha<sup>-1</sup>). W pozostałych latach wartość energetyczna metanu była istotnie mniejsza.

Technologie różniły się istotnie wartością energetyczną metanu uzyskanego z 1 ha. Średnio biorąc, w technologii konwencjonalnej wartość energetyczna metanu wynosiła 140 GJ · ha<sup>-1</sup> i była większa o 6% niż w technologii integrowanej (tab. 7.10). Technologie wykazywały różną wartość energetyczną metanu w latach badań. Gatunki roślin wykazywały istotne różnice w wartości energetycznej metanu pomiędzy badanymi technologiami. Rutwica wschodnia i tymotka łąkowa wyższą wartość energii skumulowanej w metanie uzyskała w technologii integrowanej, a mieszanka lucerny siewnej z tymotką i kupkówką pospolita w technologii konwencjonalnej. Natomiast lucerna siewna i mieszanka koniczyny łąkowej z tymotką nie różniły się statystycznie wartością energetyczną metanu pomiędzy technologiami (tab. 7.10).

## 8. Wnioski

Wieloletnie badania (2008–2012) nad wydajnością oraz energetyczną i ekonomiczną sprawnością produkcji fitomasy kukurydzy zwyczajnej, sorga cukrowego, miskanta olbrzymiego, miskanta cukrowego, rutwicy wschodniej, lucerny siewnej, tymotki łąkowej, kupkówki pospolitej, mieszanek lucerny siewnej z tymotką i koniczyny łąkowej z tymotką przeznaczonych na konwersję do biogazu – pozwalają na następujące wnioskowanie:

1. Spośród badanych roślin najwyższy plon suchej biomasy zapewniała kukurydza zwyczajna (21,5 t · ha<sup>-1</sup>). Pozostałe taksony C<sub>4</sub> plonowały istotnie gorzej, w tym miskant olbrzymi – o 20%, sorgo cukrowe – o 45%, a miskant cukrowy – o 67%. Gatunki bobowe – rutwica wschodnia i lucerna siewna zapewniały plon suchej masy o 37 i 44% niższy w stosunku do kukurydzy, mieszanki bobowo-trawiaste – 39 i 50%, a trawy C<sub>3</sub> (tymotka łąkowa i kupkówka pospolita) – odpowiednio – 62 i 55% mniejszy.

2. Istotnie większy plon suchej biomasy gatunków uzyskano w technologiach wysokonakładowych (intensywnych nawozowo). Zmniejszenie poziomu kosztów materiałowych o 12–18% w technologiach integrowanych (średnionakładowych) spowodowało relatywnie mniejszą obniżkę plonu u gatunków C<sub>4</sub>: o 2–4% u kukurydzy zwyczajnej i miskanta olbrzymiego oraz o 12% u sorga i miskanta cukrowego, a u taksonów C<sub>3</sub> – o 2–7% u rutwicy wschodniej

i lucerny siewnej i 7–8% u kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej. Tylko mieszanki bobowo-trawiaste zareagowały na zmniejszenie poziomu kosztów, głównie nawozów azotowych, relatywnie dużą obniżką plonu (o 18–36%).

3. Najwyższą wydajność energii skumulowanej w biomase gwarantowała kukurydza zwyczajna –  $390,6 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Pozostałe taksony  $C_4$  były energetycznie mniej wydajne: miskant olbrzymi – o 18%, sorgo cukrowe – o 46%, a miskant cukrowy aż o 67%. Spośród roślin bobowych wydajność energii skumulowanej w plonie rutwicy wschodniej była o 38%, a lucerny siewnej aż o 46% mniejsza. Trawy  $C_3$  (kupkówka pospolita i tymotka łąkowa) oraz mieszanki bobowo-trawiaste wypadły w tym rankingu jeszcze mniej korzystnie.

4. Najkorzystniejszy wskaźnik energetycznej sprawności produkcji biomasy zapewniał miskant olbrzymi (21,5), kukurydza (18,6), rutwica wschodnia i sorgo cukrowe (11,5), a następnie lucerna siewna (9,9). Pozostałe gatunki z traw  $C_4$  – miskant cukrowy, obydwa badane taksony traw  $C_3$  i mieszanki bobowo-trawiaste charakteryzowały się zdecydowanie niższą sprawnością w stosunku do miskanta olbrzymiego i kukurydzy zwyczajnej.

5. W ocenie energetycznej sprawności produkcji biomasy poszczególnych gatunków korzystniej wypadły technologie integrowane, a więc o mniej intensywnym nawożeniu w porównaniu z technologią wysokonakładową. Różnica ta była bardzo wyraźna (16,2–24,8%) tylko u gatunków  $C_4$  – kukurydzy zwyczajnej, miskanta olbrzymiego i sorga cukrowego. Pozostałe taksony nie zapewniały korzystniejszej sprawności produkcji biomasy w technologii integrowanej.

6. Jednostkowy koszt produkcji biomasy był wysoce zróżnicowany u poszczególnych grup roślin i gatunków. Najniższym kosztem produkcji 1 tony suchej masy charakteryzowały się trawy  $C_4$  – miskant olbrzymi i kukurydza zwyczajna ( $128$  i  $135 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ ), zdecydowanie wyższe koszty ich produkcji stwierdzono u sorga cukrowego – do  $224 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ , a nawet  $308 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$  u miskanta cukrowego. U gatunków bobowych (rutwicy wschodniej i lucerny) koszt ten układał się od  $150$  do  $177 \text{ zł} \cdot \text{t}^{-1}$ , a u traw  $C_3$  był zdecydowanie mało korzystny (o 62–92% wyższy w stosunku do miskanta olbrzymiego i o 54–82% wyższy niż u kukurydzy zwyczajnej).

7. Korzystniejszymi wartościami kosztów jednostkowych produkcji 1 tony biomasy oraz współczynnika opłacalności tej produkcji charakteryzowała się integrowana, średnionakładowa technologia uprawy (z wyjątkiem jednego wariantu trawiasto-bobowego). W produkcji integrowanej koszty jednostkowe były mniejsze o 13% u kukurydzy, 8% u rutwicy wschodniej i tymotki łąkowej oraz 7% u miskanta olbrzymiego. Wartość współczynnika opłacalności produkcji była najkorzystniejsza u kukurydzy zwyczajnej i rutwicy wschodniej. Lucerna siewna zapewniała opłacalność produkcji mniejszą o 14%, a miskant olbrzymi, sorgo cukrowe i koniczyna łąkowa z tymotką o 23–35% mniejszą.

8. Biomasa poszczególnych taksonów roślin charakteryzowała się bardzo zróżnicowanymi wyróżnikami tzw. biogazodochodowości. Zdecydowanie najkorzystniejszą wydajność jednostkową biogazu i metanu zapewniała kukurydza zwyczajna, a następnie sorgo cukrowe; biomasa obu taksonów miskantów była w tych cechach o około 34% mniej wartościowa. Spośród gatunków bobowych i traw najkorzystniejszą wydajność biogazu i biometanu uzyskiwała mieszanka lucerny siewnej z tymotką, koniczyny łąkowej z tymotką, kupkówki pospolitej i rutwicy wschodniej. Kukurydza w ocenie wolumenu uzysku biogazu i metanu była taksonem niekwestionowanym (odpowiednio ponad 11,1 tys. oraz 6,5 tys.  $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ). Z biomasy sorga cukrowego i miskanta olbrzymiego uzyskiwano poziom wartości tych cech o około 53% mniejszy, a z roślin bobowych, traw  $C_3$  i ich mieszanek od 52–77% mniejszy.

9. Intensywność technologii produkcji biomasy nie różnicowała statystycznie istotnie wydajności biogazu oraz metanu z jednostki powierzchni uprawy traw  $C_4$ . Pozostałe gatunki w technologii konwencjonalnej uzyskały większą wydajność biogazu o 6%, a metanu o 7% niż w technologii integrowanej.

10. Według własnej analizy ekonomicznej – koszt pierwotnej produkcji biomasy niezbędnej do wytworzenia 1  $\text{m}^3$  biogazu wynosił od 0,26 do 0,51 zł u traw  $C_4$  (z wyjątkiem miskanta cukrowego), od 0,42 do 0,70 zł u roślin bobowych, 0,78 zł u traw  $C_3$  i od 0,42 do 0,52 zł u mieszanek bobowo-trawiastych. Z traw  $C_4$  wartości najkorzystniejsze zapewniała kukurydza i miskant cukrowy, a z roślin bobowych i traw  $C_3$  – rutwica wschodnia i mieszanka lucerny siewnej z tymotką.

Uogólniając należy stwierdzić, że badane taksony roślin (w tym miskant olbrzymi, sorgo cukrowe i rutwica wschodnia) nie dorównywały energetyczną sprawnością i ekonomiczną efektywności pierwotnej produkcji biomasy wzorcowemu gatunkowi kukurydzy zwyczajnej. Biomasa tych gatunków (choć obfita) charakteryzowała się mało korzystnymi wyróżnikami tzw. biogazodochodowości, co zadecydowało o ostatecznie niskiej ocenie ekonomicznej ich przydatności do produkcji biogazu. Powyższe wyniki nie przekreślają możliwości praktycznego zastosowania wybranych gatunków. Są wśród nich taksony przyjazne środowisku, regenerujące fitosanitarnie i nawozowo glebę (rutwica wschodnia, lucerna siewna, ich mieszanki z trawami), nadające się do uprawy mix-cropping (sorgo cukrowe) i takie (miskant olbrzymi), których biomasa może być użyta na biogaz (alternatywnie z założonych wcześniej plantacji przeznaczonych pierwotnie do tzw. współspalania). Wszystkie taksony mogą przyczynić się do zmniejszenia udziału kukurydzy w zasiewach zabezpieczających substrat do biogazowni (hipoteza 1).

Hipoteza badawcza (2) o zasadności racjonalizowania intensywności technologii produkcji biomasy znalazła w badaniach szerokie uzasadnienie – ograniczenie nakładów materiałowych o 12–18% wpłynęło na poprawę wartości



takich wskaźników jak: energetyczna i ekonomiczna sprawność, koszty jednostkowe produkcji, opłacalność produkcji surowca. Natomiast poziom zastosowanych przemysłowych środków produkcji nie różnicował znacząco wydajności biogazu i metanu w biogazie.

## **9. Technologie produkcji na gruntach ornych roślin energetycznych na biogaz**

Przedstawiono schematy technologii produkcji biomasy badanych taksónów roślin o różnym poziomie nakładów energii na 1 ha. Zawierają one opis zabiegów, ich uwarunkowania i terminy wykonania. Szczegółowe uzasadnienie zakresu tych technologii znajduje się w treści rozdziału „Przegląd piśmiennictwa” oraz w interpretacji wyników uzyskanych w badaniach własnych.

Do opisu dołączono karty technologiczne [10, 11] każdej z metod produkcji biomasy przy użyciu maszyn i narzędzi, jakie zastosowano w badaniach łanowych.

Ze względu na wykazaną w badaniach małą przydatność biomasy miskanta cukrowego do produkcji biogazu – zrezygnowano z przedstawiania projektu technologii produkcji tego gatunku.

### **9.1. Trawy C<sub>4</sub>**

#### **Kukurydza zwyczajna**

Kukurydzę zwyczajną przeznaczoną na kiszonkę do konwersji na biogaz należy uprawiać na glebach o głębokiej warstwie ornej, szybko nagrzewających się, o dobrej strukturze oraz przepuszczalnych i posiadających odpowiednią pojemność wodną. Ich odczyn powinien być zbliżony do obojętnego. Warunki te spełniają gleby kompleksów pszennych (1 – bardzo dobry, 2 – dobry, 3 – wadliwy) oraz żytnich (4 – bardzo dobry i 2 – dobry). Należy preferować gleby żytnie. Ich duży udział w gruntach ornych kraju zabezpiecza dużą ich rezerwę pod kukurydzę.

Tabela 9.1

Schemat wysokonakładowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy kukurydzy zwyczajnej przeznaczonych na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 25,5–26,5 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Najlepszymi, rzadko dostępnymi w polskiej strukturze zasiewów przedplonami kukurydzy są rośliny okopowe na obroniku i wszytkie bobowate. Z uwagi na dużą koncentrację zbóż w strukturze zasiewów, najczęstszymi przedplonami kukurydzy są rośliny kłosowe. Zwiększa się także areal uprawy kukurydzy po sobie.	Badania dowodzą, że częsta uprawa po sobie kukurydzy, pszenicy czy jęczmienia prowadzi do fitosanitarnej degradacji gleby przez rozmnożenia grzybów patofizycznych, w tym fuzaryjnych – zmniejszających nie tylko plony, ale zagrażających masowym występowaniem mikotoksyn w siewcu.
Uprawa późniwna roli	Sposób jej wykonania wyznacza strategia odchwaszczania pola w tym zespole upraw. Samosiewy i chwasty nasienne niszczyć bezpośrednio po zbiorze przedplonu poprzez zastosowanie (płytko) agregatu zrywającego ścierni z wałem kruszącym i przyniatającym ścierni. Zabieg powtórzyć po skiełkowaniu samosiewów i chwastów (nawet 2-krotnie). W przypadku występowania chwastów rozlogowych nie podcinać ścierni, zwalczać odrosty środkami o działaniu totalnym po wytworzeniu zielonych części nadziemnych, przez które pobierany jest środek. Taka regulacja zachwaszczenia eliminuje zabiegi mechaniczne. Dopiero ostatnim zabiegiem jesiennym jest głębokie przyoranie rozlogów.	Rozkładowi ścierni sprzyja jej rozdrobnienie. Głębokosi wymieszania około 2 cm na każdą tonę ścierni (czyli 7–8 cm). Rozkład części słomiatych wymaga ok. 9 kg N na każdą ich tonę. *1 – komentarz na str. 201
Orka przedzimowa	Na glebach żwiższych wskazany termin wczesny – przełom września/października, na kompleksach żytnych – późniejszy (druga połowa października). Orka dobrze odwracająca skiby niewyrownana przed zimą. W przypadku przyorania obronika bądź biomasy międzyplonu ścierniskowego ważne jest dobre odwrócenie skiby. Głębokość konwencjonalna orki to 25 cm na kompleksach pszenicznych i 22 cm na żytnich. Część gospodarstw zmniejsza ją nawet do 15 cm.	Wyraźna tendencja do spłykania orki zmniejsza energochłonność uprawy, utrudnia jednak (przez resztki) użycie konwencjonalnych redlic.
Uprawa przedświeżna	Bronowanie na ukos zaraz po obeschnięciu pola. Następnie tzw. nieintensywna uprawa przedświeżna (wiosenna) oparta na pracy talerzy i grubera, umożliwiająca siew na głębokość 5–7 cm.	Uprawa przedświeżna nie wcześniej niż po zastosowaniu wiosennej dawki nawozów.

cd. tabeli 9.1

1	2	3
<p>Nawożenie mineralne</p>	<p>Potrzeby nawozowe kukurydzy do uzyskania 70 t biomasy naturalnej wynoszą: ~200 kg N, ~90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ~160 kg K<sub>2</sub>O i ~50 kg MgO · ha<sup>-1</sup>. Magnez, fosfor oraz 1/2 dawki potasu można aplikować przed orką przedzimową. Fosfor oraz potas (w całości) stosuje się również wiosną przed rozpoczęciem zabiegów uprawy roli.</p> <p>Dawkę nawozów azotowych należy podzielić następująco: nie więcej niż 100 kg N zastosować przedświecie wiosną razem z pozostałymi składnikami aplikowanymi w tym terminie. Drugą dawkę ~60 kg N do fazy 25 cm wysokości roślin aplikować techniką naziemną, w późniejszych fazach można poparzyć nasadę liści na łodydze – nawóz zatrzymuje się w tzw. lejkach liściowych. Kukurydza bardzo efektywnie reaguje na późniejsze (przy wysokości 30–50 cm) nawożenie RSM (40–50 kg N) z aplikacją dogłębową roztworu. Na glebach żyłnych w technologiach wysokich plonów stosować nawozy mikroelementowe (oznaczenie – K), zawierające przede wszystkim cynk, miedź i bor w dawkach dolistnych zgodnie z zaleceniami na opakowaniu.</p>	<p>Dane dotyczą gleb o średniej zasobności w przy- swajalne formy PKMg. W przypadku gleb o niskiej zasobności wymagają wydawnego zwiększenia, a przy zasobności wysokiej – zmniejszenia, patrz rozdz. 2.3.1.</p> <p>W przypadku stosowania obornika i/lub gnojowicy dawki składników NPK należy bilansować (sumo- wać). W nawozach naturalnych można pokryć na- wet 50% składnikowych potrzeb nawozowych.</p> <p>*2 – komentarz na str. 201</p>
<p>Material siewny, siew</p>	<p>Odmiany kukurydzy przeznaczone do produkcji biogazu winny charak- teryzować się wysokim plonem biomasy z calych roślin (łodygi, liście, kolba z ziarnem) o zawartości suchej masy nie mniejszej niż 32%, z wyraźnym efektem „stay green”. Są to odmiany o klasie wczesności ≥ 240. Późniejsze formy przy intensywnym nawożeniu, w warunkach III regionu uprawy w Polsce (Podlaskie, Warmińsko-Mazurskie, Pomorskie, Zachodniopomors- kie) mogą zbyt późno dojrzewać lub nie uzyskać dojrzałości „ciastowatej” korzystając z wyników PDOIR COBORU.</p> <p>Fenologiczny termin siewu kukurydzy wyznacza kwitnienie czeresni i po- ręczki czerwonej (kalendaryzowo – od 10 kwietnia do 5 maja). Minimum termiczne na głębokości 5 cm gleby nie może być mniejsze niż 8°C (wschody po 10–13 dniach). W warunkach Warmii i Mazur oraz województwa pomors- kiego – od 15 kwietnia do 10 maja. Termin opóźniony to niepełna suma temperatur efektywnych do rozwoju i niepełna dojrzałość do zbioru.</p>	<p>Hybrydowy material siewny jest środkiem produk- cji i nośnikiem postępu biologicznego. Jest jedno- krotnego użytku, nie może być odnawialny bo- wiem traci wybujałość cech (plonu) po pierwszym rozmnożeniu.</p>

cd. tabeli 9.1

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>Firma nasienna zaprawia materiał siewny dwuskładnikowym środkiem przeciw chorobom oraz szkodnikom. W intensywnej technologii uprawy na biogaz obsada roślin winna wynosić nie mniej niż 10 i nie więcej niż 12 roślin rozmieszczonych punktowo w rzędach co ~75 cm, a w rzędzie co 12–14 cm. Głębokość siewu na glebach kompleksów pszenicznych ~5 cm, żytnich ~7–8 cm.</p> <p>Dotychczas w praktyce rolniczej prowadzi się jedną – chemiczną metodę odchwaszczenia kukurydzy. W łanie dominują chwasty prosowate, groźne szczególnie w zmianowaniach z dużym jej udziałem. Dobór środków do zwalczania chwastów jest dość duży. Probowano zwalczać przede wszystkim s.a. nikosulfuron, występującą w kilku preparatach na rynku do odchwaszczenia w stadiach 1–3 liścia kukurydzy oraz w mieszaninie nikosulfuronu z alkoholem izodecyloyowym (Trend 90 EC), przedłużając czas aplikacji do 7 liścia kukurydzy.</p> <p>Wczesną, najbardziej skuteczną metodą ograniczania taksonów chwastów dwuliściennych są s.a.: tienkarbazon, acetochlor z terbutyloazyną, terbutyloazyna z metylochlorem, flufenacet z izoksaflolelem.</p> <p>W poszczególnych systemach produkcji (np. uprawa zerowa) stosowane są też nieselektywne środki do przedwschodowego odchwaszczenia jak glifosat czy glifosat z acetocholelem.</p>	<p>W siewach zagęszczonych zwiększa się liczba wykształconych kółb i ich udział w plonie, a przez to plon suchej masy.</p>
Ochrona przed chorobami	<p>Zaprawianie nasion kukurydzy jest podstawowym czynnikiem ograniczającym występowanie chorób. Zaprawa powinna dobrze przylegać i pokrywać powierzchnię nasion. Gwarantuje to odpowiednia technika nanoszenia zaprawy na ziarno (natryskowa lub proszkowa). Najczęściej stosuje się zaprawy wieloskładnikowe, które prewencyjnie działają na choroby i szkodniki oraz zawierają składniki pokarmowe zapewniające prawidłowy rozwój młodej siewce. Dopuszczone do stosowania w Polsce zaprawy fungicydowe (s.a. gludioxonil, metaloksyl-M, karboksyna z tiuramem) przeciwdziałają zgorzeli siewek i głowni kukurydzy, a zaprawy przeciwko szkodnikom (s.a. imidachlopryd, metiokarb.) zwalczają m.in. płoniarke zbożową, pędraki, rolnice i drutowce.)</p>	<p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle wg wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012, 2013).</p>
		<p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle wg wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012, 2013).</p>

cd. tabeli 9.1

1	2	3
Zwalczanie szkodników	<p>Najgroźniejszymi szkodnikami w uprawach kukurydzy są: płoniarzka zbożowa, omacnica prosowianka, zachodnia stonka kukurydziana oraz mszyce. Regulację ich populacji przeprowadza się za pomocą insektycydów opartych o s.a.: lambda-cyhalotryna oraz mieszaninę tiachloprydu z deltametryną. Największe szkody na plantacjach kukurydzy powoduje omacnica prosowianka, której larwy drążą kanały w łodygach i liściach, przez co osłabiają rośliny i zmniejszają intensywność fotosyntezy. Uszkadzają też podstawę kłoby oraz jej wnętrze, co powoduje spadek udziału nasion w kłobie, a nawet opadanie całych kłob. Chemiczne zwalczanie tego agrofaga jest trudne z przyczyn technicznych (wysokość roślin przekracza 150 cm) i dlatego IOR zaleca mechaniczną walkę polegającą na wczesnym zbieraniu uszkodzonych roślin (dość trudne w wielkoobszarowych gospodarstwach) oraz mechaniczne rozdrabnianie słomy i resztek na plantacjach aby wyeliminować owada zimą.</p>	<p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle wg wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012, 2013).</p> <p>*3 – komentarz na str. 201</p>
Zbiór biomasy	<p>Termin zbioru determinuje zawartość suchej masy – przynajmniej 30% (dojrzałość woskowa, zwana w produkcji ciastowatą), jednak nie więcej niż 35% (dojrzałość pełna). Taka koncentracja suchej masy zapewni najniższe straty podczas procesu kisenia oraz optymalne użycie biogazu. Technika zbioru biomasy powinna gwarantować niskie (10–15 cm) koszenie roślin oraz dokładne rozdrobnienie biomasy (8–12 mm) z dużym udziałem uszkodzonych ziaren, gwarantujące lepsze zakiszenie. Zbiór wykonać jednym etapowo, sieczkarniami jedno- lub wielorzędowymi sprzężonymi z ciągnikiem rolniczym lub samojezdnymi, wielorzędowymi.</p>	<p>Ponieważ przebieg pogody w okresie wegetacji decyduje o tempie gromadzenia suchej masy (brak opadów przyspiesza ubytek wody w biomacie), dlatego to zawartość suchej masy, a nie faza rozwoju roślin powinna decydować o terminie koszenia.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.2  
Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy kukurydzy zwyczajnej przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 23–24 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Choć rośliny okopowe na oborniku oraz bobowate są najlepszymi przedplonami kukurydzy, to jednak krajowa struktura zasiewów decyduje, że najczęstszym przedplonem kukurydzy uprawianej na biomase energetyczną są zboża, w tym także kukurydza.	Coraz większe zainteresowanie celowymi uprawami roślin na cele energetyczne sprzyja monokulturowej ich uprawie.
Uprawa poźniwna roli	Wykonać według przewidywanego w skutkach sposobu, czyli podorać pole przykrywając precyzyjnie resztki poźniwne i zabronować (za skibą). Podorywkę pielęgnować za pomocą średniej lub ciężkiej brony, a po odleżeniu gleby przez płytkie zastosowanie kultywatora. Zapewnić to niszczenie kiełkujących nasion chwastów i samosiewów roślin przedplonowych. Do regulacji chwastów rozłogowych wykonać głębszą podorywkę, a następnie (kilkukrotnie) kultywatorować w celu wyciągnięcia rozłogów na powierzchni pola, przesuszać i przewracać broną, a na końcu głęboko przyorać ziemię.	Na każdą tonę resztek słomiatych zastosować ~9 kg N przed podorywką. Głębokość podorywki ~7–8 cm, a w przypadku stosowania metody mechanicznego zwalczania perzu – nie mniejsza niż 12 cm.
Orka przedzimowa	Wykonać na średnią głębokość ~25 cm – na glebach kompleksów pszennych i 18–22 cm – na kompleksach żytnich. Dobrze odwróconą skibę zostawić na zimę bez wyrównywania. Orkę wykonać w dogodnym organizacyjnie czasie, nie wcześniej niż w drugiej połowie października.	Tradycyjna uprawa czyni głębę podatną na erodowanie i straty składników przez wymywanie, przez co wpływa na eutrofizację wód powierzchniowych.
Uprawa przedziewna	Zabronować pole na ukos zaraz po obeschnięciu skib. Bezpośrednio przed siewem poprawić głębę agregatem do przedziewnej uprawy na głębokość nie większą niż ~7 cm	Zabieg wykonać nie wcześniej niż po stosowaniu nawozów mineralnych.
Nawożenie mineralne	Potrzeby nawozowe kukurydzy przy plonie ~65 t · ha <sup>-1</sup> biomasy w technologii średnionakładowej, na glebach o co najmniej średniej zasobności w przyswajalne makroskładniki, wynoszą ~70 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , ~130 kg K <sub>2</sub> O i ~45 kg MgO oraz ~160 kg N · ha <sup>-1</sup> . Racjonalne nawożenie potasem wymaga podziału na 2 dawki – 1/2 pod orkę przedzimową, a reszta wiosną. Fosfor można aplikować w całości pod orkę przedzimową, podobnie jak magnez. Nawozy azotowe podzielić na dwie dawki; około 65% – przedziewnie wiosną, a resztę do 25 cm wysokości roślin (przy technice stosowania nawozów	W badaniach własnych plony kukurydzy w technologii K oraz I różniły się średnio za 4 lata tylko o ~3% przy różnicowaniu nakładów energii w nawozach i środkach ochrony roślin o 22%. Dawki nawozów w gnojowicy, oborniku i nawozach mineralnych należy bilansować/sumować.

cd. tabeli 9.2

1	2	3
<p>Material siewny, siew</p>	<p>sypkich) lub do 50 cm wysokości roślin (przy technice stosowania nawozów płynnych, np. RSM). W technologiach wysokich plonów kukurydza wymaga uzupełniającego nawożenia mikroelementami (oznakowanie – K) w stadiach rozwojowych kiedy aplikacja dolistna jest technicznie możliwa.</p> <p>Na cele biogazowe należy wybierać odmiany cechujące się wysokim plonem suchej masy, dobrą strawnością, wysoką odpornością na fuzariozy łodyg i ziarna oraz wykazujące wyraźny efekt „stay green” (ziarno dojrzewa przy zachowaniu zieloności całej rośliny). W warunkach północno-wschodniej Polski cechy te zapewniją mieszance o klasie wczesności FAO 240 i 250. Późniejsze formy (przy intensywnym nawożeniu) mogą dojrzewać zbyt późno lub nie uzyskiwać dojrzłości „ciastowatej” ziarna. Doboru odmian należy dokonywać w oparciu o KR oraz wyniki badań PDOiR COBORU. Termin siewu powinien uwzględniać nagrzanie gleby na głębokości 5 cm do minimum 8°C. W warunkach III regionu uprawy w Polsce to termin od 10 kwietnia do 5 maja. Producent materiału siewnego zapewnia jego zaprawienie środkami chorobo- i owadobójczym.</p> <p>Po siewie obsada winna wynosić 12–14 roślin na 1 m<sup>2</sup>. Z uwagi na stosowaną technikę zbioru zachować odległość między rzędami ~75 cm.</p> <p>Głębokość siewu na glebach kompleksów pszennych ~5 cm, żytnich ~7–8 cm.</p>	<p>Hybrydowy materiał siewny jest środkiem produkcji i nośnikiem postępu biologicznego. Jest jednokrotnego użytku, nie może być odnawialny, bowiem traci wybujałość cech (plonu) po pierwszym rozmnożeniu.</p> <p>W siewach zagęszczonych zwiększa się liczba wykształconych kolb i ich udział w plonie, a przez to obniża plon suchej masy.</p>
<p>Regulacja zachwaszczenia</p>	<p>Bronowanie zasiewów kukurydzy aż do fazy 4 liści pozwala wyeliminować wschodzące chwasty w stadium liścieni i pierwszych liści. Zabieg ten ogranicza głównie liczebność gatunków dwuliściennych (nieprosowatych). Można je też skutecznie ograniczać pielęgnacją mechaniczną wykonywaną narzędziami wyposażonymi w noże kątowe i gęsiostopki (np. piełnikami i wielorakami uniwersalnymi). Jest to jednak zabieg trudny organizacyjnie w wielkoobszarowych gospodarstwach.</p> <p>Chemiczne ograniczanie zachwaszczenia jest najskuteczniejsze w systemie aplikacji środków z nikosulfuronem w mieszaninie z Trendem 90 EC, tienkarbazonu, acetochloru z terbutoylazyną, flufenacetu z izoksafłutolem i in. Taksony prosowate zwalczą przede wszystkim s.a. nikosulfuron</p>	<p>Integrowana ochrona polega na użyciu co najmniej dwóch metod do ograniczania populacji poszczególnych agrofagów, w tym chwastów.</p> <p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle według wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012, 2013).</p>

cd. tabeli 9.2

1	2	3
Ochrona przed chorobami	<p>(w kilku preparatach na rynku) w stadiach 1–3 liści kukurydzy oraz mieszanina nikosulfuronu z alkoholem izocykloowym aplikowana aż do 7 liścia kukurydzy. Wczesną, najbardziej skuteczną metodą ograniczania taksonów dwuliściennych są preparaty zawierające s.a. terbutyloazyna z metylochlorem.</p> <p>Ochronę przed chorobami zapewnią przede wszystkim zaprawa nasienna. Zabieg zaprawiania wykonuje profesjonalna firma nasienna, gdyż wymagana jest właściwa technologia pokrycia i przyczepności do ziarna. Zaprawy zwalczające zgorzel siewek i gównię kukurydzy oparte są o s.a. gludioxonil, metaloksyl-M, karboksyna z tiuramem. Zaprawy na szkodniki (ploniarke zbożową, pędraki, rolnice, drutowce) zawierają imidachlopryd (w różnych nazwach środków) oraz metiokarb.</p>	<p>Zaprawianie ziarna siewnego jest najskuteczniejszym sposobem ograniczania sprawców chorób, a także w małym stopniu oddziaływają negatywnie na środowisko.</p> <p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle według wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012, 2013).</p>
Zwalczanie szkodników	<p>Chemiczne zwalczanie 3 najgroźniejszych szkodników kukurydzy jest oparte na jednej substancji aktywnej – lambda-cyhalotrynie oraz mieszaninie tiachloprydu z deltametryną.</p> <p>Wobec technicznych trudności w chemicznym zwalczaniu najgroźniejszego owada – omacnicy prosowianki – IOR zaleca mechaniczną walkę polegającą na czesnym zbieraniu uszkodzonych roślin oraz mechanicznym rozdrtaniu słomy i resztek na plantacjach w zabiegach podorywkowych, aby wyvrozić owada zimą.</p>	<p>Środki chemiczne wolno stosować ściśle według wskazań instrukcji stosowania zgodnej z zaleceniami GIORIN i Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (Program Ochrony Roślin Rolniczych 2012/2013).</p>
Zbiór biomasy	<p>Zbiór wyznacza stadium dojrzałości oraz zawartość suchej masy w biomacie z całych roślin wynosząca 30–35%. Termin koszenia należy przyspieszyć z powodu braku opadów we wrześniu, gdzie następuje wysychanie liści i gwałtowny ubytek wody w biomacie. Do zbioru użyć maszyn rozdrtających lodygi na odcinki około 10 mm i gniotących ziarno, co przyspiesza fermentację i zwiększa uzysk biogazu. Kukurydzę na biogaz zbiera się nisko, nie tracąc biomasy nawet o gorszym składzie włókna.</p>	<p>Konwersja biomasy do biogazu wymaga wcześniejszego jej zakonserwowania przez zakiszenie. Dlatego w celu uniknięcia strat wynikających z konserwacji o terminie zbioru powinna decydować zawartość suchej masy.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne



\*1 W sposobie uprawy roli pod kukurydzą zachodzą bardzo szybkie zmiany, głównie za sprawą dużego postępu w rozwoju konstrukcji maszyn i narzędzi rolniczych. System płuzny tradycyjny zapewnia przewidywalne skutki, ale jest energochłonny (dwie orki w jednym roku), gleba jest łatwo erodowana i przemywana. Jest stosowany (po zmniejszeniu liczby orok w zmianowaniu) w systemie integrowanej uprawy roli.

System uproszczony dotyczy zaniechania podorywki i zastąpienia jej płytką uprawą spulchniającą bez odwracania skiby, z pozostawieniem ścierniska tylko w wierzchniej warstwie gleby. Orka przedzimowa jest również często spłycona, przez co płycej przyorane są resztki poźniwne.

System uprawy kukurydzy w mulcz jest warunkowany wczesnym siewem międzyplonu, przerośnięciem korzeniami płytko przyoranych resztek i wbudowaniem składników nawozowych w biomasę międzyplonu, która wytworzona jesienią przemarznie zimą lub zostanie zherbicydowana wiosną. Kukurydzę wsiać w mulcz specjalnym siewnikiem. Wiosną możliwa jest uprawa całej powierzchni pola lub tylko pasów pod wysiew nasion.

System najbardziej uproszczony, zwany siewem bezpośrednim, bez uprawy poźniwnej, pozostawia resztki na powierzchni gleby. Siew jest utrudniony, wymaga specjalnych redlic przecinających słomę (lub ją odgarniających), a następnie glebę. Możliwe jest tylko odchwaszczanie chemiczne. Nawozy są słabo przemieszczane w profilu gleby. System wymaga wielu jeszcze przystosowań do warunków Polski.

\*2 Kukurydza jest wrażliwa na nawożenie wapniem. Dlatego dla utrzymania równowagi jonowej w glebie przy niskim pH należy zastosować przynajmniej pół roku przed siewem nawozy wapniowe. Nawożenie wapniowo-magnezowe powinno uwzględniać kategorię agronomiczną gleby. Im cięższa gleba, tym mniejsza tolerancja niskiego pH i jego podwyższenie jest bardziej niezbędne. Na glebach bardzo lekkich wskazane jest wapnowanie przy pH od 4,6 do 5,0, natomiast na glebach ciężkich od 6,1 do 6,5. Wówczas potrzeby nawozowe wynoszą od 1 t CaO · ha<sup>-1</sup> na glebach bardzo lekkich do 2 t CaO · ha<sup>-1</sup> na glebach ciężkich. Zależą one również od zdolności buforowych gleb.

\*3 W miarę wzrostu arealu zasiewów kukurydzy zwiększa się zagrożenie plantacji przez ploniarzę zbożówkę, omacnicę prosowiankę, zachodnią stonkę kukurydzianą oraz mszyce. Straty powodowane przez samą omacnicę szacowane są w Polsce na 20% i tylko na południu i południowym wschodzie wynoszą rocznie 280 mln zł. Chemiczne, skuteczne ograniczanie owada przypada w okresie, gdy łan ma wysokość 2–2,5 m, co jest niewykonalne technicznie. Pozostaje więc tylko niechemiczne niszczenie owada przez wymrożenie. Użycie kukurydzy z genem Bt odpowiedzialnym za toksyczność białka Cry1A(b) dla larw jest w Polsce prawnie zabronione.

### **Sorgo cukrowe**

Sorgo cukrowe jako surowiec biogazowy należy uprawiać na glebach ciepłych i zasobnych w składniki pokarmowe, zatrzymujących wodę, o dobrym składzie mechanicznym. Do lokalizowania plantacji nadają się gleby kompleksów żytnich (4 – bardzo dobry, 5 – dobry) oraz zbożowo-pastewnego mocnego (8) należące do IIIb, IVa i IVb klasy bonitacyjnej. Gleby V i VI klasy bonitacyjnej w warunkach małej sumy opadów nie zapewniają jednak wysokich plonów biomasy (tab. 9.3, 9.4).

### **Miskant olbrzymi**

Nasadzenia miskanta olbrzymiego należy lokalizować na glebach średnich i lżejszych, należących do 4 i 5 kompleksu przydatności rolniczej (żytni bardzo dobry i żytni dobry), klasy bonitacyjnej IIIb, IVa i IVb, o wysokim poziomie wód gruntowych. Z uwagi na obfity system korzeniowy miskanta, uprawy można lokalizować na terenach łatwo erodowalnych, lecz nie w zagłębieniach terenu (ryzyko wystąpienia wiosennych przymrozków) (tab. 9.5, 9.6).

## **9.2. Rośliny bobowe (motylkowe) i trawy C<sub>3</sub>**

### **Lucerna siewna**

Lucernę siewną przeznaczaną na biogaz w warunkach północnej Polski należy uprawiać na glebach średniozwięzłych o uregulowanych stosunkach powietrzno-wodnych i charakteryzujących się średnią zasobnością w fosfor i potas. Warunki te spełniają gleby kompleksów: pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego, pszennego wadliwego, żytniego bardzo dobrego i żytniego dobrego (klasy bonitacyjne od I do IVa). W wyborze preferować jednak klasy bonitacyjne od IIIa do IVa.

Lucerna siewna wymaga gleb o odczynie zbliżonym do obojętnego, dlatego na glebach wymagających wapnowania (poniżej pH 5,5) po zbiorze przedplonu przeprowadzić wapnowanie nawozem typu węglanowego, a na glebach charakteryzujących się dodatkowo niską zawartością magnezu wapnowanie nawozem wapniowo-magnezowym. Nawóz wapniowy powinien charakteryzować się wysoką zawartością węglanu wapnia, dobrym rozdrobnieniem i wysoką reaktywnością, aby szybko, ale nie gwałtownie podnieść odczyn gleby. Na glebach, gdzie wapnowanie jest wskazane (poniżej pH 6), zastosowane wapno nawozowe winno się powoli rozkładać, aby uwalniany do gleby wapń uzupełniał zasobność gleby w ten składnik i neutralizował zachodzący w glebie proces zakwaszania. Dawkę wapna określić w oparciu o kategorię agronomiczną gleby, aktualny jej odczyn, zasobność w wapń, zawartość wapnia w nawozie i jego reaktywność. W przypadku gdy, stanowisko przeznaczone pod uprawę

Tabela 9.3

Schemat wykonawstwa (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy sorga cukrowego przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 19–20 GJ

Odcz*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	<p>Najlepszymi przedplonami dla sorga cukrowego są okopowe na obronniku i strączkowe jednoroczne oraz trawy w uprawie polowej, w tym w mieszankach z bobowatymi wieloletnimi. Najczęściej przedplonem są jednak zboża pozostawiające duże ilości resztek bogatych w składniki pokarmowe. Z powodu dużego wysycenia struktury zasiewów zbożami stanowiska te najczęściej są wybierane dla sorga. Na glebach słabszych mogą być również trawy użytkowane na cele energetyczne, w tym sorgo.</p>	<p>Sorgo cukrowe nie stanowi wysokiej wartości przedplonowej dla innych roślin. Cecha ta nasila się, zwłaszcza w monokulturowych zasiewach energetycznych.</p>
Uprawa poźniwna roli	<p>Po zbożach zastosować zestaw do upraw poźniwnych (np. agregat talerzowy), płytko podciąć i wymieszać ścierną z glebą, co zapobiegnie nadmiernej parowaniu wody i przyspieszy wschody (zabieg powtórzyć). Po przedplonach trawiastych lub bardzo zachwaszczonych wieloletnimi chwastami rozłożowymi wykonać desykację pola glifosatem. Odczekać, po czym pole stałozować i głęboko zaorać.</p>	<p>Na każdą tonę resztek słomiatych zastosować ~9 kg N przed uprawą poźniwną, którą wykonać na głębokość ~7–8 cm.</p>
Orka przedzimowa	<p>Orkę zimową wykonać na średnią głębokość 22–25 cm. Wysztorcowaną skibę pozostawić niewyrównaną. Na stanowiskach po przedplonach trawiastych lub po wywiezieniu obornika zastosować plug z odkładnikami śrubowymi w celu lepszego odwrócenia skiby.</p>	<p>Pozostawienie powierzchni pola w ostrej skibie sprzyja akumulacji wody pozimowej oraz przyspiesza ogrzewanie gleby.</p>
Uprawa przedświeżna	<p>Po dostatecznym obесchnięciu gleby wykonać płytką (6–8 cm) uprawę za pomocą biernego agregatu uprawowego z łapami sztywnymi i wałem strunowym lub brony średniej na ukos pola. Jeśli powierzchnia pola jest bardzo nierówna zastosować agregat posiadający w zestawie włókę.</p>	<p>Przedświeżną uprawę powierzchni pola wykonać po zastosowaniu nawozów mineralnych.</p>
Nawożenie mineralne	<p>Potrzeby nawozowe sorga uprawianego w technologii wysokonakładowej (w warunkach średniej zasobności gleby w przyswajalne formy składników) przy plonie biomasy ~60 t · ha<sup>-1</sup> wynoszą: ~60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ~110 kg K<sub>2</sub>O i ~30 kg MgO oraz ~150 kg N · ha<sup>-1</sup>. Nawożenie potasem podzielić na 2 części. Jesienią zastosować 50% dawki potasu oraz fosfor i magnez. Wiosną, przedświeżnie aplikować 60% dawki azotu. Resztę nawozów azotowych, najlepiej w formie roztworu saletrzano-</p>	<p>Nawożenie sorga cukrowego powinno opierać się o analizę składników pokarmowych w profilu glebowym, dawki nawozów mineralnych należy zbilansować o zastosowane nawozy naturalne.</p>

cd. tabeli 9.3

1	2	3
Materiał siewny, siew	<p>-mocznikowego (RSM) zastosować w trakcie vegetacji roślin, gdy ich wysokość nie przekracza 60 cm. Użyć w tym celu specjalne aplikatory dogłębowe. Jeśli do siewu nasion używa się specjalnego siewnika z aplikatorami nawozu część nawozów mineralnych wysiać współrzędnie z nasionami sorga. Taki sposób siewu zapewni bezpośrednią dostępność składników nawozowych podczas kiełkowania i ma szczególnie duże znaczenie w siewach opóźnionych.</p> <p>Do siewu wybierać odmianę kiszonkową sorga cechującą się wysokim potencjałem produkcyjnym zielonej masy, wysoką tolerancją na suszę, odporną na wylęganie i choroby oraz zawierającą dużo cukru w roślinie, co wpływa korzystnie na proces zakiszania.</p> <p>Obrotem materiałem siewnym sorga zajmują się firmy dystrybuujące przede wszystkim nasiona kukurydzy. Materiał siewny powinien być zaprawiony przynajmniej dwuskładnikową (fungicyd, insektycyd) zaprawą nasienną. Sorgo znacznie bardziej niż kukurydza reaguje na niskie temperatury wiosenne, a optymalna temperatura gleby do siewu wynosi ~11°C. Z tego powodu termin siewu sorga w warunkach Polski przypada pomiędzy 2 dekadą maja i 1 dekadą czerwca (około 25-30 dni później niż siew kukurydzy).</p> <p>Nasiona należy wysiewać siewnikiem punktowym do kukurydzy z odpowiednimi tarczami wysiewającymi o otworach 2-4 mm. Ponieważ technika zbioru oraz ewentualnej mechanicznej pielęgnacji odchwasczającej jest analogiczna jak u kukurydzy rozstawa rzędów powinna wynosić ~75 cm. Ziarniaki sorga umieszczać w glebie na głębokości od 3 cm (na glebach żwięższych) do 6 cm (na glebach lżejszych). Ze względu na mniejszy pokrój roślin i słabsze zwarcie ładu, sorgo wymaga siewów gęstszych niż kukurydza. Masa wysiewu nasion powinna zapewniać docelową obsadę 22-24 roślin na 1 m<sup>2</sup>.</p>	<p>Uprawa sorga cukrowego jako substratu do konwersji na biogaz jest w Polsce jeszcze mało zaawansowana. W związku z tym ilość dostępnych odmian, nadających się do uprawy w warunkach agroklimatycznych Polski jest mała.</p> <p>Możliwa jest uprawa sorga wraz z kukurydzą w technologii „mix-cropping”. Z uwagi na różną reakcję roślin obu gatunków na suszę technologia ta zapewnia wierność plonowania biomasy. Jednak w warunkach Polski, z przyczyn technicznych (brak odpowiedniego sprzętu) taka technologia produkcji jest rzadka.</p>

cd. tabeli 9.3

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	Konkurencyjność roślin sorga wobec chwastów jest mała, szczególnie w początkowych fazach wzrostu. W odchwaszczaniu chemicznym zwrócić uwagę na zalecenia dotyczące temperatury powietrza podczas stosowania środka, gdyż rośliny sorga są wrażliwe (bardziej niż kukurydza) na poparzenia środkiem chwastobójczym. Opis wybranych badań ściślych nad regulacją zachwaszczenia sorga przedstawiono w rozdziale 2.3.2.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych herbicydów do ochrony chemicznej sorga. Jedyną dostępną metodą walki z zachwaszczeniem jest stosowanie mechanicznych zabiegów odchwaszczających. W praktyce rolniczej stosuje się jednak niektóre herbicydy, zarejestrowane w uprawie kukurydzy. Jest to niezgodne z prawem, a skutki takich praktyk spadają wyłącznie na producenta.
Ochrona przed chorobami	Sorgo cukrowe w uprawie na biomase do zakiszania nie wymaga pielęgnacji fungicydowej. Podstawową barierę dla sprawców chorób stanowi zaprawa nasienna dedykowana przez producenta materiału siewnego.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych środków fungicydowych do ochrony sorga.
Zwalczanie szkodników	Szkodniki owadzie towarzyszące uprawie sorga mają istotne znaczenie jedynie w technologiach uprawy na ziarno. W Polsce na plantacjach sorga energetycznego nie poznano jeszcze szkodników towarzyszących tej uprawie. Nie ma zatem przesłanek do stosowania ochrony chemicznej.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych insektycydów w programie ochrony sorga.
Zbiór biomasy	Termin koszenia sorga, podobnie jak kukurydzy, determinowany jest zawartością suchej masy, która powinna wynosić >25%. W normalnych warunkach zbiór wykonać jednoetapowo. Do zbioru użyć sieczkarni samojezdnych, rozdrabniających biomase na ocinki długości 10–12 mm. Wysokość koszenia powinna wynosić około 20 cm. Jednak przy dużym uwodnieniu biomasy wysokość ścinania sorga obniżyć o 5–10 cm w celu większej koncentracji suchej masy. Rośliny sorga cukrowego w lata z dużą ilością opadów mają tendencję do wylegania, szczególnie w uprawie z wysokim poziomem nawożenia azotowego. Wówczas zbiór roślin jest utrudniony, co wpływa na gorszą jakość zbieranej biomasy. Przy wysokim stopniu wylegnięcia, w skrajnych sytuacjach wymagany jest zbiór dwuetapowy (koszenie kosiarką listwową na pokosy, a następnie rozdrobnienie za pomocą sieczkarni z podbieraczem).	O terminie zbioru decyduje stopień uwodnienia biomasy. Jednak osiągnięcie optymalnej zawartości suchej masy jest często trudne do osiągnięcia. Dlatego uprawa sorga w technologii „mix-cropping” z kukurydzą wydaje się być bardzo psyzszościowa. Wymaga ona jednak zastosowania odpowiednich maszyn z innym zestawem elementów roboczych. Technologie propagują niektóre firmy hodowlano-nasienne i produkujące maszynny.

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.4

Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy sorga cukrowego przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 17–18 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	<p>Uprawę sorgo najlepiej lokalizować na stanowiskach zasobnych w składniki pokarmowe. Warunki te spełniają przedplony okopowe nawożone obornikiem oraz bobowate, głównie strączkowe jednoroczne i trawy w uprawie polowej, w tym w mieszankach z bobowatymi wieloletnimi. Jednak najczęściej są to zboża.</p>	<p>Sorgo cukrowe pozostawia podobne resztki poźniwne jak kukurydza. Nie wskazana jest ich uprawa po sobie.</p>
Uprawa późniwna roli	<p>W integrowanej technologii uprawy sorga rodzaj zabiegów i sposób ich wykonania determinuje rodzaj przedplonu. Późniwna uprawa roli polega na płytkim podcięciu (zerwaniu) ścierni oraz wymieszaniu resztek poźniwnych z warstwą gleby. Zastosować agregat talerzowy z wałem (strunowym) lub klasyczny zrywacz ścierni. Płytki zabieg sprzyja lepsze rozkładowi materii organicznej resztek, przerywa nadmierne parowanie wody oraz stymuluje kiełkowanie chwastów i samosiewów zbóż. W stanowisku po przedplonach trawiastych lub zachwaszczonych wieloletnimi chwastami rozłogowymi (np. perzem) wykonać klasyczną podorywkę polegającą na odwróceniu gleby i przesuszeniu rozłogów perzu. Następnie wykonać 2–3-krotne bronowanie (broną średnią) wyciągające rozłogi na powierzchni pola w celu ich wysuszenia. Tak wysuszone rozłogi przyorac głęboką zieleń.</p>	<p>Na każdą tonę resztek stromiastych zastosować ~9 kg N przed podorywkę. Głębokość podorywki ~7–8 cm, w przypadku stosowania metody wysuszenia perzu – nie mniej niż 12 cm.</p>
Orka przedzimowa	<p>Wykonać na głębokość ~24 cm. Wysztorcowaną skibę pozostawić bez wyrównywania. Po przedplonach trawiastych zastosować plug z odkładnikami śrubowymi w celu lepszego przykrycia pozostałych resztek darni.</p>	<p>Pozostawienie powierzchni pola w ostrej skibie sprzyja akumulacji wody pozimowej oraz przyspiesza ogrzewanie gleby.</p>
Uprawa przedświeżna	<p>Wiosną, po obeschnięciu powierzchni pola wykonać płytką (~5–7 cm) uprawę przedświeżną. Zastosować w tym celu bierny agregat uprawowy z łapami sztywnymi i wałem strunowym lub broną średnią na ukos pola. Jeśli powierzchnia pola jest bardzo nierówna – zastosować włókę do wyrównania w pierwszym wiosennym zabiegu.</p>	<p>Przedświeżną uprawę powierzchni pola wykonać po zastosowaniu nawozów.</p>

cd. tabeli 9.4

1	2	3
<p>Nawożenie mineralne</p>	<p>Przy prognozowanym plonie biomasy wynoszącym <math>\sim 55 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}</math>, przy średniej zasobności gleby w przyswajalne formy składników potrzebny nawozowe wynoszą: <math>\sim 50 \text{ kg P}_2\text{O}_5</math>, <math>\sim 90 \text{ kg K}_2\text{O}</math>, <math>\sim 25 \text{ kg MgO}</math> oraz <math>\sim 120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}</math>. Potas, fosfor oraz magnez zastosować pod orkę zimową. Wiosną przed uprawą przedsiewną zastosować 60% dawki azotu. Pozostałą część azotu, najlepiej w formie płynnej – RSM (roztwór saletrzano-mocznikowy), zastosować w trakcie wegetacji, jednak nie później niż do czasu osiągnięcia przez rośliny wysokości 55–65 cm. Technika nawożenia RSM-em powinna zapewniać wprowadzenie płynnego nawozu bezpośrednio do gleby (konieczne aplikatory dogłębowe).</p>	<p>Nawożenie sorga cukrowego powinno opierać się o analizę składników pokarmowych w profilu glebowym, a dawkę nawozu należy zbilansować o zastosowane nawozy naturalne.</p>
<p>Materiał siewny, siew</p>	<p>Przy wyborze odmiany sorga cukrowego kierować się jej wysoką produktywnością, dużą tolerancją na suszę, odpornością na wylęganie i choroby oraz wysoką zawartością cukru w roślinie.          Optymalna temperatura gleby do siewu sorga wynosi <math>10\text{--}12^\circ\text{C}</math>. Termin tej operacji agrotechnicznej przypada w warunkach Polski pomiędzy 20 maja a 10 czerwca.          Materiał siewny sorga powinien być zaprawiony środkami fungicydowymi i insektycydem. Dodatkowo, w zależności od producenta materiału siewnego, zaprawa nasienna może zawierać substancje nawozowe stymulujące wzrost młodych siewek.          Materiał siewny sorga wysiać punktowo, stosując siewnik z odpowiednimi tarczami wysiewającymi o otworach 2–4 mm. Nasiona powinny być umieszczone w glebie na głębokości dostosowanej do żyzności gleby: 3 cm – na glebach żwierzłych oraz 6 cm – na glebach lżejszych. Masa wysiewu ma zapewnić docelową obsadę 220–240 tys. roślin na hektarze. Analogiczna technika zbioru jak kukurydzy wymaga uprawę w rozstawie rzędów 75 cm.</p>	<p>Uprawa sorga cukrowego jako substratu przeznaczonego do konwersji na biogaz jest w Polsce jeszcze mało zaawansowana. Dlatego liczba dostępnych odmian, nadających się do uprawy w warunkach agroklimatycznych Polski jest mała.</p>

cd. tabeli 9.4

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	Do regulacji zbiorowiska chwastów na plantacji sorga zastosować metodę mechaniczną, wspomaganą doraźnie chemicznymi zabiegami odchwaszczającymi. Wykonać pielnie międzyrzędzi (ich krotkość powinna być dostosowana do intensywności pojawów chwastów). Metoda mechaniczna jest niekompleksowa, gdyż nie eliminuje roślin chwastów z bezpośredniego otoczenia roślin sorga. Dlatego przy nasilonym występowaniu chwastów wykonać odchwaszczanie chemiczne jako uzupełniające.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych herbicydów do ochrony sorga. Jedyną dostępną metodą walki z zachwaszczeniem jest stosowanie mechanicznych zabiegów odchwaszczających. W praktyce rolniczej stosuje się jednak niektóre herbicydy zarejestrowane w uprawie kukurydzy. Jest to niezgodne z prawem, a ewentualne niekorzystne skutki ponosi rolnik.
Ochrona przed chorobami	Zaprawianie nasion jest wystarczającym zabiegiem ograniczającym infekcje chorobowe.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych środków fungicydowych do ochrony sorga.
Zwalczanie szkodników	W uprawach sorga cukrowego na biomase przeznaczoną do konwersji na biogaz nie odnotowano jeszcze masowych, przekraczających proggi szkodliwości pojawów szkodników owadzi. W związku z tym nie ma przesłanek do stosowania ochrony chemicznej. Wystarczającym zabiegiem jest zaprawianie materiału siewnego.	Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych insektycydów do stosowania w programie ochrony sorga.
Zbiór biomasy	Do zbioru sorga na kisonkę przystąpić, gdy uwodnienie całych roślin jest mniejsze niż 75%. W tym celu wykorzystywać sieczkarnie jedno- lub wielorzędowe sprzężone z ciągnikiem lub sieczkarnie samojezdne. Mechanizmy tnące maszyn powinny zapewniać koszenie roślin na wysokości ~20 cm oraz rozdrobnienie biomasy na odcinki długości 10–12 mm. W lata z małą ilością opadów w sierpniu i wrześniu rośliny dojrzewają szybciej, stąd zbiór przyspieszyć.	Z uwagi na duże straty soków podczas zakiszania biomasy, zbioru należy dokonać dopiero, gdy rośliny osiągną odpowiednią zawartość suchej masy.

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne



Tabela 9.5  
Schemat wysokonakładowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy miskanta olbrzymiego przeznaczoney na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 18–19 GJ · ha<sup>-1</sup>

Ocult*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Dobrze reaguje na przedplony okopowe, bobowate, a nawet zbożowe. Z uwagi na długi okres użytkowania (do 20 lat) stanowisko należy przygotować wg zasad DPR (zlikwidować podzeszwy pluzną, zachwaszczenie gatunkami rozlogowymi, doprowadzić pH do właściwego dla typu gleby i zasobność w składniki pokarmowe do poziomu średniego etc.)	Plantacje miskanta olbrzymiego użytkuje się od 15 do nawet 20 lat. W związku z tym wybór stanowiska powinien być poprzedzony analizą miejsca w rozlogu gospodarstw, odległości od trwałych nasadzeń etc.
Uprawa późniwna roli	Wykonanie upraw późniwnych dostosować do rodzaju przedplonu i warunków wilgotnościowych gleby. Szcierń powinna zostać dobrze pocięta i wymieszana z glebą. W tym celu użyć kultywatora lub agregatu talerzowego z wałem. Po skiełkowaniu chwastów i samosiewów wykonać bronowanie. Przy dużym nasileniu chwastów rozlogowych zamiechać uprawy powierzonej na rzecz chemicznej wykonanej herbicydem o działaniu totalnym.	Rozkładowi ścierni sprzyja jej rozdrobnienie. Głębokosć wymieszania ok. 2 cm na każdą tonę ścierni (czyli 7–8 cm). Rozkład części słomiatych wymaga ok. 9 kg N na każdą ich tonę.
Orka przedzimowa	Zaschnięte chwasty, resztki po przedplonie oraz obornik przyorać zieblą. Orkę wykonać nie wcześniej niż w 2 dekadzie października na głębokość 25, a nawet 30 cm i pozostawić na zimę bez wyrównania. W przypadku przyorania obornika lub dużej ilości resztek późniwnych – skibę dobrze odwrócić, zastosować zatem odkładnice śrubowe lub półśrubowe.	Prawidłowe wykonanie orki zimowej sprzyja gromadzeniu wody pozimowej i zapewnia dogodne warunki wilgotnościowe młodym sadzonkom miskanta wiosną.
Zakładanie plantacji	Wiosną po obeschnięciu gleby jako pierwszy zabieg wykonać bronowanie na ukos wyrównujące powierzchni pola. Następnie za pomocą agregatu uprawowego z łapami sztywnymi wykonać uprawę (9–11 cm) gleby do wysadzenia kłaczy miskanta. Materiał rozmnożeniowy miskanta stanowią sadzonki vegetatywne (rizomy), które pozyskuje się (najlepiej bezpośrednio przed sadzeniem) z plantacji matecznej. Sadzonki stanowią 10 cm fragmenty kłaczy (posiadające 2–3 węzły) z karpki matecznej wyoranej wiosną tego samego roku. Rizomy wysadzić na przełomie kwietnia i maja, w dobrze ogrzanej i posiadającą jeszcze duże zasoby wody pozimowej glebę. Sadzonki umieszczać w glebie na głębokości 7–8 cm w rozstawie rzędów – 75 cm. Ilość wysadzanych kłaczy powinna zapewnić docelową obsadę 2 szt. · m <sup>-2</sup> . Odległość sąsiadujących	Uprawę przedświwną wykonać nie wcześniej niż po zastosowaniu nawozów mineralnych.  Rizomy powinny pochodzić z plantacji matecznych o zbliżonych warunkach agroklimatycznych. Powinny być właściwie zabezpieczone przed wyschnięciem podczas transportu.

cd. tabeli 9.5

1	2	3
Nawożenie mineralne	<p>W roku założenia plantacji dawki nawozów mineralnych powinny być małe. Młode rośliny miskanta nie są w stanie wykorzystać dużych dawek składników nawozowych, a ich nadmiar sprzyja wzrostowi zachwaszczenia. Zastosować jako dawkę startową 30–50 kg <math>P_2O_5</math> oraz 50–60 kg <math>K_2O \cdot ha^{-1}</math> przed uprawą wiosenną, natomiast po przyjęciu się sadzonek – 50 kg <math>N \cdot ha^{-1}</math>. W przypadku zastosowania obornika pod orkę zimową dawkę nawozów mineralnych zbilansować, czyli zmniejszyć o 1/2 – 2/3. Potrzeby nawozowe miskanta do uzyskania –60 t biomasy przy średniej zawartości przyswajalnych form składników w glebie wynoszą: ~140 kg N, ~80 kg <math>P_2O_5</math>, ~120 kg <math>K_2O</math> i ~40 kg MgO. Dotyczy to dopiero 3, 4 i dalszych lat po nasadzeniu. W 1 i 2 roku użytkowania (koszenia) są to wartości na poziomie 30% powyższych potrzeb. Magnez, fosfor, potas oraz 70% azotu wsiąść wiosną przed ruszeniem vegetacji. Pozostałą dawkę azotu zastosować nie później niż w fazie, gdy młode pędy osiągną ~20 cm wysokości. W latach pełnego użytkowania plantacji można również nawozić gnojowicą. Wówczas dawkę nawozów mineralnych należy odpowiednio pomniejszyć. Gnojowicę, w dawce <math>20 m^3 \cdot ha^{-1}</math>, stosować wiosną przed ruszeniem vegetacji albo pogłównie przy pomocy aplikatorów doglebowych w międzyrzędzia.</p>	<p>Poziom nawożenia NPKMg pod miskant przeznaczony na biomase do produkcji biogazu, a zbierany jesienią na kiszonkę jest zasadniczo inny (wyższy niż użytkowany do współspalania i zbierany (koszony) zimą. Wczesny zbiór jesienią, przed całkowitym dojrzewaniem, uniemożliwia przeprowadzenie składników z części nadziemnej do karp, co ma miejsce przy zbiorze zimowym. Nawożenie organiczne stosować w oparciu o analizę laboratoryjną zawartości składników pokarmowych (różna zawartość w zależności od pochodzenia nawozu).</p>

cd. tabeli 9.5

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>Plantacjom miskanta towarzyszą liczne zbiorowiska chwastów, zarówno jedno- jak i dwulicienne. Szczególnie uciążliwe są taksony jednolicienne: chwastnica jednostronna (<i>Echinochloa crus-galli</i>), miotła zbożowa (<i>Apera spica-venti</i>) oraz perz właściwy (<i>Elymus repens</i>). Stosować jedynie prawnie dostępną metodę odchwaszczenia – mechaniczne pielienie międzyrzędzi, chociaż liczne badania dowodzą możliwości stosowania środków ochrony roślin w uprawach miskanta (więcej na ten temat w rozdziale 2.3.3).</p> <p>W odkrytych międzyrzędziach w roku sadzenia oraz w 1 roku (czasem także w 2 roku) po sadzeniu regulować zachwaszczenie chemicznie po wykiełkowaniu nasion chwastów, ale przed wybicciem pędów miskanta z karp. Podczas wzrostu części nadziemnej miskanta łatwo jest ograniczać populację chwastów pielniakiem.</p> <p>W długoletnich nasadzeniach zachwaszczenie się utrzymuje, ale nie jest groźne dla wydajności. Poddaje się regulacji chemicznej wczesną wiosną przed wypuszczeniem pędów z karp.</p>	<p>Zdolności konkurencyjne roślin miskanta wobec chwastów są małe, szczególnie w 1 i 2 roku uprawy.</p> <p>Plantacje miskanta uprawiane na biogaz wymagają intensywniejszej regulacji zachwaszczenia niż uprawy przeznaczone do współspalania, bowiem brak warstwy ściółki z opadniętych liści zimą ułatwia zachwaszczenie łanu.</p> <p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin przeznaczonych pod uprawy miskanta.</p>
Ochrona przed chorobami	<p>W warunkach Polski nie stwierdzono, aby patogeny towarzyszące uprawom miskanta olbrzymiego powodowały znaczące straty w plonach biomasy. Natomiast istnieje niebezpieczeństwo, że w przyszłości patogeny te przyczynią się do spadku produktywności miskanta.</p>	<p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin przeznaczonych pod uprawy miskanta.</p>
Zwalczanie szkodników	<p>Plantacje miskanta są zasiedlane przez liczną faunę owadów, zarówno pożytecznych (głównie pluskwiaki różnoskrzydłe, muchówki i chrząszcze), jak i szkodliwych (skrzypionka zbożowa, skrzypionka błękitka, lednica zbożowa, zieleniżyc zielonawy oraz mszyce). W Polsce nie odnotowano jednak przypadków szkodliwości wyrażających się spadkiem plonu biomasy.</p>	<p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin przeznaczonych pod uprawy miskanta.</p>
Zbiór biomasy	<p>Zbioru biomasy miskanta na biogaz dokonać, gdy rośliny są jeszcze zielone – zawierają nie więcej niż 50% s.m. Większa koncentracja suchej masy wpływa ujemnie na uzysk biogazu. Termin zbioru przypada zwykle w październiku. Do zbioru użyć tych samych maszyn co w technologii zbioru kukurydzy (sieczkarnie samojezdne).</p>	<p>Zbyt małe uwilgotnienie biomasy stanowi barierę w efektywnej konwersji suchej masy organicznej do biogazu.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.6  
Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy miskanta olbrzymiego przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 17–18 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegu, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Miskant olbrzymi dobrze toleruje zarówno przedplony okopowe i bobowate, jak i zbożowe. Długi okres użytkowania (do 20 lat) plantacji wymaga odpowiedniego przygotowania stanowiska. Należy zlikwidować podszewę pluzną, poprawiając przepuszczalność gleby i warunki wodnopowietrzne, zredukować populację wieloletnich chwastów rozłogowych (np. perzu), w oparciu o analizę chemiczną gleby uregulować jej pH, a zasobność w składniki pokarmowe doprowadzić do średniej.	Plantacje miskanta olbrzymiego użytkuje się od 15 do nawet 20 lat. W związku z tym wybór stanowiska powinien być poprzedzony analizą miejsca w rozłogu gospodarstwa, odległością od trwałych nasadzeń etc.
Uprawa poźniwna roli	Integrowaną produkcję biomasy miskanta oprzeć na tradycyjnej uprawie poźniwniej roli polegającej na podorywce wykonanej na głębokość 10–12 cm, pozwalającej na niszczenie chwastów nasiennych jak i rozłogowych. W przypadku chwastów nasiennych bezpośrednio po wschodach należy wykonać bronowanie i zabieg powtarzać okresowo po wschodach chwastów (tzw. podorywka pielęgnowana). W przypadku chwastów rozłogowych podorywki nie broniuje się, lecz kultywatoruje łapami sprężystymi (przynajmniej pół-sprężystymi) wyciągającymi rozłogi perzu, które na powierzchni pola wysychają i tracą zdolność odrastania. Rozłogi wyciąga się broną średnią lub ciężką. Czynnność ta może być powtarzana. Ostatnią operacją niszczenia rozłogów jest ich głębokie przyoranie orką przedzimową.	Lepszemu rozkładowi resztek sprzyja dokładne ich rozdrobnienie. Głębokość wymieszania resztek – ok. 2 cm na każdą tonę ścierni (czyli 7–8 cm). Rozkład części słoniastych wymaga ok. 9 kg N na każdą ich tonę.
Orka przedzimowa	Orkę zimową wykonać po 15 października. Gleba powinna być odwrócona na głębokość 25–30 cm i pozostawiona bez wyrównania. W przypadku przyorania obornika lub dużej ilości resztek poźniwnych ważne, aby skiba była dobrze odwrócona – zastosować zatem odkładnie śrubowe lub pół-śrubowe.	Prawidłowe wykonanie orki przedzimowej sprzyja gromadzeniu wody pozimowej i zapewnienia dogodne warunki wilgotnościowe młodym sadzonkom miskanta.
Zakładanie plantacji	Wczesną wiosną wykonać bronowanie na ukos w celu wyrównania powierzchni pola. Przed wysadzeniem rizomów miskanta za pomocą agregatu uprawowego z łapami sztywnymi wykonać uprawę na głębokość ~10 cm. Stosować sadzonki wegetatywne. Rizomy są fragmentami kłączy o długości 10 cm, pozyskanymi z karp podziemnych z plantacji matecznych nie wcześniej niż dzień przed planowanym sadzeniem.	Z uwagi na długi okres użytkowania plantacji przygotowanie gleby do wysadzenia rizomów powinno być bardzo staranne. Uprawę przedsięwzięną wykonać nie wcześniej niż po zastosowaniu nawozów mineralnych.

cd. tabeli 9.6

1	2	3
<p>Nawożenie mineralne</p>	<p>Rizomy wysadzać w glebie, gdy jest ona dostatecznie ogrzana i posiada jeszcze duże zasoby wody pozimowej. Termin sadzenia w warunkach Polski przypada na przełomie kwietnia i maja. Sadzonki umieszczają w glebie na głębokości 7–8 cm w rozstawie rzędów ~75. Docelowa obsada rizomów powinna wynosić 20 tys. szt. na hektar. Odległość roślin w rzędzie powinna wynosić od 60 do 70 cm. Ubytki uzupełnić w roku następnym.</p> <p>Technika sadzenia winna zapewnić umieszczenie rizomów w bruzdzie, a następnie ich przykrycie warstwą gleby i przycięście w celu zapewnienia lepszego podsiąku wody. Stosować przystosowane w tym celu sadzarki automatyczne lub półautomatyczne. Jeżeli technika sadzenia nie zapewnia podsiąku należy użyć gładkiego ławkowego wału posiewnego do zagęszczenia gleby po posadzeniu.</p> <p>W roku zakładania plantacji unikać wysokiego nawożenia mineralnego, gdyż wolno rozwijające się rośliny miskanta pobierają małe ilości składników nawozowych. Nadmiar składników w glebie stymuluje intensywny rozwój chwastów na plantacji. Przed zastosowaniem agregatu uprawowego wysiać 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oraz 50 kg K<sub>2</sub>O przed uprawą agregatem, natomiast po przyjęciu się sadzonek – 50 kg N · ha<sup>-1</sup>. Jeśli zastosowano obornik, wówczas dawkę składników należy zbilansować (zmniejszyć lub zrezygnować z nawozów mineralnych).</p> <p>Potrzeby nawozowe miskanta do uzyskania ~55 t biomasy przy średniej zasobności gleby w przyswajalne formy składników wynoszą: ~110–120 kg N, ~50–70 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ~90–100 kg K<sub>2</sub>O i ~40 kg MgO. Taki poziom nawożenia dotyczy lat pełnego użytkowania plantacji. W 1 i 2 roku użytkowania (koszenia) są to wartości na poziomie 30% powyższych potrzeb.</p> <p>Magnez, fosfor, potas oraz 70% azotu wysiać wiosną przed ruszeniem wegetacji. Pozostałą dawkę azotu zastosować nie później niż w fazie gdy młode pędy osiągną ~20 cm wysokości.</p> <p>W integrowanej technologii uprawy miskanta nawożenie plantacji można oprzeć o płynne nawozy organiczne lub poferment z biogazowni. W takim przypadku dawki nawozów mineralnych należą zbilansować. Można też nawozić plantację osadami ściekowymi wiosną, przed ruszeniem wegetacji w dawce około 60 t · ha<sup>-1</sup>, co może zmniejszyć dawki nawozów mineralnych</p>	<p>Rizomy powinny pochodzić z plantacji matecznych o zbliżonych warunkach agroklimatycznych.</p>
		<p>Poziom nawożenia NPKMg pod miskant przeznaczone na biomase do produkcji biogazu i zbierany jesienią na kiszonkę jest zasadniczo inny (wyższy) niż użytkowany do współspalania i zbierany (koszony) zimą. Wczesny zbiór jesienią, przed całkowitym dojrzaniem uniemożliwia przeprowadzenie składników z części nadziemnej do karp, co ma miejsce przy zbiorze zimowym.</p> <p>Nawożenie organiczne stosować w oparciu o analizę laboratoryjną zawartości składników pokarmowych (różna zawartość w zależności od pochodzenia nawozu).</p> <p>Zasady stosowania odpadów ściekowych reguluje art. 53 ust. 1 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. o odpadach (t.j. Dz.U. 2010 r., nr 185, poz. 1243 z późn. zm.) oraz Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. nr 137).</p>

cd. tabeli 9.6

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>nawet o 50%. W nawożeniu osadami unikać naniesienia nawozu na powierzchni młodych pędów. Najlepiej użyć wozy asenizacyjne z aplikatorami do międzyrzędzi.</p> <p>Plantacjom miskanta olbrzymiego towarzyszą zbiorowiska chwastów, zarówno jedno-, jak i dwuliściennych. Szczególnie uciążliwe są taksony jednoliścienne: chwastnica jednostronna, miotła zbozowa oraz perz właściwy. Stosować jedynie prawnie dostępną metodę odchwaszczania – mechaniczne pielnie międzyrzędzi, chociaż liczne badania dowodzą możliwości stosowania środków ochrony roślin w uprawach miskanta (więcej w rozdziale 2.3.3).</p> <p>W odkrytych międzyrzędziach w roku sadzenia oraz w 1 roku (czasem także w 2 roku) po sadzeniu regulować zachwaszczenie chemicznie po wykiełkowania chwastów, ale przed wybicciem pędów miskanta z karp.</p> <p>W czasie wzrostu części nadziemnej miskanta łatwo jest ograniczać populację chwastów piełnikiem mechanicznym, zaopatrzoną w gęstostopki.</p> <p>W latach użytkowania zachwaszczenie nie jest groźne dla wydajności. Można wykonać regulację chemiczną wczesną wiosną przed wypuszczeniem pędów z karp.</p>	<p>Zdolności konkurencyjne roślin miskanta wobec chwastów są małe, szczególnie w 1 i 2 roku uprawy.</p> <p>Plantacje miskanta uprawiane na biogaz wymagają intensywniejszej regulacji zachwaszczenia niż uprawy przeznaczone do wspólnego spalania, bowiem brak warstwy ściółki z opadniętych liści zimą ułatwia zachwaszczenie łąnu.</p> <p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin przeznaczonych pod uprawy miskanta.</p>
Ochrona przed chorobami	<p>W warunkach Polski w uprawach miskanta nie odnotowano szkodliwego działania patogenów towarzyszących uprawom.</p>	<p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin do stosowania w uprawach miskanta olbrzymiego.</p>
Zwalczanie szkodników	<p>W Polsce nie odnotowano przypadków szkodliwości wyrażających się spadkiem plonu biomasy.</p>	<p>Obecnie w zaleceniach GIORIN nie ma środków ochrony roślin do stosowania w uprawach miskanta olbrzymiego.</p>
Zbiór biomasy	<p>Termin zbioru biomasy miskanta przeznaczonej do konwersji na biogaz uzależniony od uwilgotnienia roślin (powinny zawierać ~50% s.m.). Termin zbioru przypada zwykle w październiku. Niektóre w wrześnie występują długotrwałe okresy posuchy, wówczas rośliny miskanta zaczynają przedwześnie zasychać. W takim wypadku zbiór należy przyspieszyć. Zastosować taką samą jak u kukurydzy technikę zbioru (użyć sieczkarni samojedznej).</p>	<p>Zbyt małe uwilgotnienie biomasy stanowi barierę w efektywnej konwersji suchej masy organicznej do biogazu.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.7

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy kukurydzy zwyczajnej przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
1	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32,0	1	–	VIII <sub>2-3</sub>
2	orka zimowa	plug 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8,0	1	–	IX <sub>3</sub> -X <sub>3</sub>
3	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40,0	1	–	III
4	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	IV <sub>1-3</sub>
5	uprawa przedsiewna	bierny agregat uprawowy Agromasz AU50, szer. rob. 5 m + John Deere 6630	40,8	1	–	IV <sub>1-3</sub>
6	siew kukurydzy	siewnik punktowy Maschio Gaspardo 6-rzędowy (rozstawa 75 cm) + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	IV <sub>1</sub> -V <sub>1</sub>
7	odchwaszczanie chemiczne	opryskiwacz polowy Pilmet Power 2500 + Zetor Proxima Power 100	56,0	1	–	V-VI
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	V-VI
9	zbiór biomasy	sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, John Deere 6630 + przyczepa Forschnit T088, Zetor Proxima Power 100 przyczepa Forschnit T088	8,0	2	1	IX-X

Tabela 9.8

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji biomasy kukurydzy zwyczajnej przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
1	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32,0	1	–	VIII <sub>2-3</sub>
2	nawożenie organiczne (obornik)	rozzrutnik obornika Unia Group Tytan 13 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	8,0	2	–	IX–X
3	orka zimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8,0	1	–	IX–X
4	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40,0	1	–	III
5	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	IV <sub>1-3</sub>
6	uprawa przedsiewna	bierny agregat uprawowy Agromasz AU50, szer. rob. 5 m + John Deere 6630	40,8	1	–	IV <sub>1-3</sub>
7	siew kukurydzy	siewnik punktowy Maschio Gaspardo 6-rzędowy (rozstawa 75 cm) + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	IV <sub>1</sub> –V <sub>1</sub>
8	odchwaszczanie mechaniczne	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V–VI
9	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	V–VI
10	zbiór biomasy	sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, John Deere 6630 + przyczepa Forschnit T088, Zetor Proxima Power 100 przyczepa Forschnit T088	8,0	2	1	IX–X



Tabela 9.9

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy sorga cukrowego przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
1	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32,0	1	–	VIII <sub>2-3</sub>
2	orka zimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8,0	1	–	IX <sub>3</sub> -X <sub>3</sub>
3	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40,0	1	–	III
4	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	IV <sub>1-3</sub>
5	uprawa przedsiewna	bierny agregat uprawowy Agromasz AU50, szer. rob. 5 m + John Deere 6630	40,8	1	–	IV <sub>1-3</sub>
6	siew sorga	siewnik punktowy Maschio Gaspardo 6-rzędowy (rozstawa 75 cm) + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V <sub>2</sub> -VI <sub>1</sub>
7	odchwaszczanie mechaniczne	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V-VI
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	V-VI
9	zbiór biomasy	sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, John Deere 6630 + przyczepa Forschnit T088, Zetor Proxima Power 100 przyczepa Forschnit T088	8,0	2	1	IX-X

Tabela 9.10

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji biomasy sorga cukrowego przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
1	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32,0	1	–	VIII <sub>2-3</sub>
2	nawożenie organiczne (obornik)	rozrzutnik obornika Unia Group Tytan 13 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	8,0	2	–	IX–X
3	orka zimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8,0	1	–	IX–X
4	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40,0	1	–	III
5	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	IV <sub>1-3</sub>
6	uprawa przedsiewna	bierny agregat uprawowy Agromasz AU50, szer. rob. 5 m + John Deere 6630	40,8	1	–	IV <sub>1-3</sub>
7	siew sorga	siewnik punktowy Maschio Gaspardo 6-rzędowy (rozstawa 75 cm) + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	IV <sub>1-V<sub>1</sub></sub>
8	odchwaszczanie mechaniczne	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V–VI
9	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	V–VI
10	zbiór biomasy	sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, John Deere 6630 + przyczepa Forschnit T088, Zetor Proxima Power 100 przyczepa Forschnit T088	8,0	2	1	IX–X

Tabela 9.11

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy miskanta olbrzymiego przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
Rok założenia plantacji						
1	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32,0	1	–	VIII <sub>2-3</sub>
2	orka zimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8,0	1	–	IX <sub>3</sub> –X <sub>3</sub>
3	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40,0	1	–	III
4	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	IV <sub>3</sub>
5	uprawa przedsięwna	bierny agregat uprawowy Agromasz AU50, szer. rob. 5 m + John Deere 6630	40,8	1	–	IV <sub>3</sub>
6	sadzenie rizomów miskanta	sadzarka półautomatyczna SMG 4-rzędowa + Zetor Proxima Power 100	3,2	1	1	IV <sub>3</sub> –V <sub>1</sub>
7	odchwaszczanie mechaniczne (x2)	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V–VI
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	V–VI
Lata pełnego użytkowania plantacji						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	–	III <sub>3</sub> –IV
2	odchwaszczanie mechaniczne	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	–	V–VI



cd. tabeli 9.12

1	2	3	4	5	6	7
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630 + Zetor Proxima Power 100 z turem	120,0	2	-	V-VI
1	nawożenie organiczne	wóz asenizacyjny MEPROZET PN-120 z aplikatorami doglebowymi + John Deere 6630	-	1	-	III <sub>3</sub> -IV <sub>3</sub>
2	odchwaszczanie mechaniczne (2,3 rok)	opielacz Becker 6-rzędowy + Zetor Proxima Power 100	16,0	1	-	V-VI
3	nawożenie organiczne	wóz asenizacyjny MEPROZET PN-120 z aplikatorami doglebowymi + John Deere 6630	-	1	-	V-VI
4	zbiór biomasy	sieczkarnia samojezdna John Deere 7200, John Deere 6630 + przyczepa Forschnit T088, Zetor Proxima Power 100 przyczepa Forschnit T088	8,0	2	1	IX-X

lucerny siewnej charakteryzuje się kwaśnym odczynem gleby, wapnowanie przeprowadzić w dwóch zabiegach – pierwszy pod przedplon, a drugi pod lucernę siewną (w dwóch równych dawkach wynikających z potrzeb wapnowania). Zabieg wapnowania pod lucernę siewną można pominąć, gdy gleba posiada odczyn obojętny i przynajmniej średnią zasobność w wapń (tab. 9.13, 9.14).

### Rutwica wschodnia

Rutwicę wschodnią na cele biogazowe w warunkach północnej Polski uprawiać można na glebach gliniasto-piaszczystych, piaskach zalegających na glinach charakteryzujących się średnią zasobnością w składniki pokarmowe. Warunki te spełniają gleby klas bonitacyjnych od IIIa do V, które posiadają odczyn obojętny lub lekko kwaśny (pH powyżej 5,5). W wyborze preferować jednak gleby 4 kompleksu przydatności rolniczej. Na glebach o pH niższym od 6,0 po zbiorze przedplonu należy wykonać wapnowanie nawozem typu węglanowego. Przy niskiej zasobności gleb w magnez najlepiej zastosować wapno węglanowo-magnezowe. Dawka wapna musi uwzględniać kategorię agronomiczną gleby, jej aktualny odczyn i rodzaj nawozu wapniowego (9.15, 9.16).

### **Mieszanki lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową**

Pod uprawę mieszanek motylkowo-trawiastych – lucerny siewnej z tymotką łąkową i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową – wykorzystywanych do celów pozyskania biogazu, przeznaczyć gleby kompleksów od pszennego bardzo dobrego do żytniego dobrego. Gleby z kompleksu pszennego wadliwego są mniej przydatne do uprawy koniczyny łąkowej z tymotką ze względu na małe zdolności retencjonowania wody. Generalnie powinny to być gleby zwięzłe i średniozwięzłe, zasobne w składniki pokarmowe mające odczyn zasadowy do lekko kwaśnego. Gleby charakteryzujące się odczynem o pH poniżej 6,0 należy przed założeniem plantacji zwapnować wapnem węglanowym. W warunkach niskiej zasobności gleb w magnez zastosować nawóz wapniowy w formie wapna magnezowego. Potrzeba wapnowania powinna być określona na podstawie aktualnych badań gleby. Dawka nawozu wapniowego powinna być ustalona w oparciu o kategorię agronomiczną gleby oraz ocenę potrzeb wapnowania (tab. 9.17, 9.18).

### **Kupkówka pospolita i tymotka łąkowa**

Trawy przeznaczone do przemennego użytkowania na gruntach ornych w technologii wysokonakładowej najlepiej uprawiać na glebach nie wymagających wapnowania (pH powyżej 6,0). W technologii średnionakładowej mogą to być gleby wymagające wapnowania (pH poniżej 5,8). Kupkówka pospolita nadaje się do uprawy na glebach zaliczanych do kompleksów od pszennego bardzo dobrego do żytniego bardzo dobrego. Jej uprawa jest też możliwa na glebach kompleksów żytniego dobrego i żytniego słabego (na tych glebach jej plony będą niższe). Tymotkę łąkową uprawiać na glebach żyznych, odpowiednio wilgotnych i nie przesycających przez dłuższe okresy. Warunki te spełniają gleby kompleksów: pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego i żytniego bardzo dobrego.

Tabela 9.13

Schemat wysokomakładowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy lucerny siewnej przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 21,3–22,3 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Najlepszymi, chociaż rzadko dostępnymi w polskiej strukturze zasiewów przedplonami lucerny siewnej są rośliny okopowe na oborniku. Ze względu na duży udział zbóż w strukturze zasiewów dobrym przedplonem są zboża, ozime lub jare, o podobnych do lucerny wymaganiach glebowych. Nie należy uprawiać jej po sobie i innych roślinach bobowych. Po zakończeniu użytkowania stanowi bardzo dobry przedplon dla roślin następczych – zbóż ozimych i jarych, rzepaku ozimego etc.	Uprawa lucerny po sobie i innych roślinach bobowych prowadzi do wylucernienia, czyli zmęczenia gleby polegającego na zamieraniu roślin na skutek nagromadzenia w niej bakteriofagów niszczących bakterie brodawkowe wiążące wolny azot atmosferyczny. Plantację należy w pełni użytkować przez dwa lata.
Uprawa poźniwna roli	Sposób wykonania wyznacza strategia odchwaszczania pola w tym zespole upraw. Samosiewy i chwasty nasienne niszczyć bezpośrednio po zbiorze przedplonu poprzez zastosowanie agregatu ścierniskowego. W przypadku występowania chwastów rozłogowych (głównie perzu właściwego) zastosować herbicyd totalny po wytworzeniu zielonych części nadziemnych, przez które pobierany jest środek. Taka regulacja zachwaszczenia opóźnia niszczenie ścierni o około 3 tygodnie.	Zerwanie ścierni i wymieszanie resztek poźniwnych z glebą na głębokość około 10 cm przyspiesza rozkład resztek poźniwnych. W przypadku konieczności wapnowania zabiegi wykonać przed tym zespolem upraw.
Orka przedzimowa	Wskazany termin – druga dekada października. Orka głęboka (25–30 cm) dobrze odwracająca skiby i wyrównana jednym przejazdem brony przed zimą.	Wyrównanie przedzimowe pozwala na płytszą uprawę wiosenną i wysoki podsiąk do płytko posiadanych nasion.
Uprawa przedzimowa	Wiosenne zabiegi rozpocząć od bronowania i wyrównania wierzchniej warstwy roli. Przerwie to parowanie wody i zapobiegne zaskorupieniu i zbrzyleniu gleby, co mogłoby w znaczącym stopniu pogorszyć warunki wschodów drobnych nasion lucerny. Bezpośrednio przed siewem wykonać płytką (-3 cm) uprawę przedzimową przy użyciu agregatu złożonego z kultywatora i wałów strunowych. Uprawę przedzimową można wykonać razem z siewem nasion przy zastosowaniu agregatu uprawowo-siewnego.	Uprawa przedzimowa nie wcześniej niż po zastosowaniu wiosennej dawki nawozów.
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji w siewie bez rośliny ochronnej nawożenie mineralne wykonać bezpośrednio przed siewem. Na glebach średnio zasobnych w fosfor i potas zastosować: 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 100 kg K <sub>2</sub> O oraz azot w dawce 30 kg N · ha <sup>-1</sup> , najlepiej w formie szybko działającej (np. saletry amonowej).	Dane dotyczą gleb o średniej zasobności w przyswajalne formy fosforu i potasu. W przypadku gleb o niskiej zasobności nawożenie wydadtne zwiększyć, a przy zasobności wysokiej – zmniejszyć.

cd. tabeli 9.13

1	2	3
	<p>Nawożenie azotem lucerny wynika z faktu, że młode rośliny, pomimo rozpoczęcia symbiozy z bakteriami brodawkowymi wiążącymi wolny azot atmosferyczny z powietrza, mogą cierpieć na niedobór tego składnika w glebie do czasu rozpoczęcia symbiozy.</p> <p>W latach pełnego użytkowania nawożenie mineralne ograniczyć do stosowania nawozów fosforowych i potasowych. Nawozy mineralne zastosować po wznowieniu wegetacji lucerny w dawkach 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> · ha<sup>-1</sup> i 140 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. Nawożenie azotem jest zbędne z powodu jej intensywnej symbiozy z bakteriami wiążącymi wolny azot z powietrza. Ze względu na wysoką dawkę potasu i tendencję lucerny do luksusowego jego pobierania stosowanie tego składnika rozłożyć na dwa terminy – wczesną wiosną 70 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>, a resztę po zbiorze pierwszego pokosu.</p> <p>Do założenia plantacji lucerny siewnej wykorzystać odmiany charakteryzujące się przede wszystkim wysokim potencjałem produkcji biomasy i wysoką zimotrwałością. Doboru odmian należy dokonywać w oparciu o KR, korzystając z wyników PDOiR COBORU.</p> <p>W warunkach północnej Polski plantację lucerny siewnej najlepiej założyć w siewie bez rośliny ochronnej. Siew wykonać w trzeciej dekadzie kwietnia, w ilości 10–13 kg · ha<sup>-1</sup> nasion (obsada 500–700 szt · m<sup>-2</sup>), na głębokość 2 cm – na glebach lżejszych i 1,5 cm – na glebach cięższych, w rozstawie rzędów wynoszącej 10–13 cm. Bezpośrednio przed siewem nasiona zaprawić zaprawą nasienną chroniącą młode siewki przed chorobami grzybowymi oraz zaszcześcić nitratyną zawierającą szczep bakterii <i>Rhizobium meliloti</i>. Po siewie przeprowadzić walowanie, aby polepszyć warunki wschodów.</p>	<p>Przy niskiej zasobności dawkę fosforu należy zwiększyć o 50%, a potasu – o 40%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności i dawki te zmniejszyć o ten sam wskaźnik.</p>
Materiał siewny, siew	<p>Do założenia plantacji lucerny siewnej wskazane jest na polach, gdzie od dłuższego czasu nie uprawiano lucerny. Zabieg ten zapewni odpowiednie zaopatrzenie roślin lucerny w azot wiązany przez bakterie brodawkowe.</p>	<p>Szczeplenie nitratyną wskazane jest na polach, gdzie od dłuższego czasu nie uprawiano lucerny. Zabieg ten zapewni odpowiednie zaopatrzenie roślin lucerny w azot wiązany przez bakterie brodawkowe.</p>
Regulacja zachwaszczenia	<p>Młode rośliny lucerny w początkowym okresie rozwoju, ze względu na stosunkowo powolny wzrost, są bardzo podatne na zachwaszczenie. Obecnie w kraju nie ma zarejestrowanych środków do regulacji zachwaszczenia lucerny po wschodach. Z tego względu pielęgnacja zasiewów w roku siewu powinna ograniczać się do przykaszania chwastów wyrastających ponad lucernę. Wysokość koszenia 7–10 cm nad glebą. W następnych latach użytkowania plantację wiosną bronować, które stymuluje jej wzrost, zwalczając chwasty i powoduje lepsze wykorzystanie stosowanych w tym czasie nawozów mineralnych.</p>	<p>W latach pełnego użytkowania wiosenne bronowanie plantacji ma na celu wymieszanie zastosowanych nawozów i przewietrzenie wierzchniej warstwy gleby.</p>



cd. tabeli 9.13

1	2	3
<p>Zbiór biomasy</p>	<p>W roku założenia plantacji w siewie bez rośliny ochronnej lucerna daje dwa pokosy fitomasy. Pierwszy pokos zbierać w fazie kwitnienia roślin, a drugi pod koniec wrzesnia. W latach pełnego użytkowania najkorzystniej jest zbierać trzy pokosy – pierwszy w fazie pąkowania, drugi w fazie kwitnienia, a trzeci w fazie pąkowania, jednak nie później niż pod koniec wrzesnia.</p> <p>Metoda zbioru biomasy zależy od dostępnego sprzętu. Najlepiej zbiór wykonać sieczkarnią samojezdną, która kosi i rozdrabnia masę roślinną. Można też zbierać dwuetapowo, czyli kosić na pokosy i pozostawiać do przeschnięcia, a następnie zgrabić zgrabiarzkami na wałki i zwiąć prasami w bele cylindryczne do sporządzania sianokiszonki. Przesuszoną biomasę można też zbierać przyczepami samobierającymi wyposażonymi w przystawkę do cięcia roślin na krótkie fragmenty lub sieczkarniami samojezdnymi wyposażonymi w podbieracze pokosów i konserwować przez zakiszanie. Zakiszanie najlepiej wykonywać w przyzmacach lub silosach przejazdowych. Czas formowania przyzmy lub silosu nie powinien trwać dłużej niż dwa dni.</p> <p>W gospodarstwach nie posiadających odpowiedniego sprzętu do cięcia i zakiszania fitomasy lucerny w silosach i przyzmacach odpowiednią formą konserwacji jest sporządzanie kiszonek w belach cylindrycznych owijanych szczelną folią.</p> <p>Do sporządzania kiszonek z lucerny, która ze względu na wysoką zawartość białka w biomacie należy do roślin trudno się zakiszających, należy stosować preparaty biologiczne lub chemiczne ułatwiające zakiszanie i stabilizujące kiszonkę.</p>	<p>Koszenie lucerny należy przeprowadzać na wysokości nie mniejszej niż 6–8 cm, aby nie uszkadzać szyjek korzeniowych. Do tego celu nie należy używać kosiarzek opartych na bijakowych aparatach tnących, które uszkadzają jej szyjki korzeniowe. W przypadku poduszania biomasy na pokosach urządzenia koszące powinny być wyposażone w zgniatacze pokosów, które przyspieszają dosuszenie do wilgotności 30–40%.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.14

Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy lucerny siewnej przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 20,6–21,6 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Najlepszym przedplonem lucerny siewnej są rośliny okopowe na obronniku i zboża uprawiane na nawozach naturalnych. Spadający udział okopowych, a duży zbóż w strukturze zasiewów sprawia, że należy lokować ją w stanowiących po zbożach. Nie należy uprawiać jej po sobie i innych roślinach bobowych.	Uprawa lucerny po sobie i innych roślinach bobowych nie jest wskazana, ponieważ prowadzi do zjawiska „zmezczenia gleby”, które powoduje zamieranie roślin na skutek bakteriofagów niszczących bakterie brodawkowe wiążące wolny azot atmosferyczny. Plantację w pełni użytkować przez dwa lata.
Uprawa późniwna roli	W przypadku stanowisk utrzymanych w dobrej kulturze (bez chwastów trwałych) po zbiorze przedplonu wykonać niszczenie ścierni agregatem do uprawy późniwniej. Gdy występuje konieczność zwalczania chwastów rozłogowych (głównie perzu właściwego) wykonać najprostszą, najtańszą i najszybszą metodę ich zwalczania, czyli wykonanie po zbiorze przedplonu oprysku ścierniska preparatami opartymi na glifosacie i pozostawienie pola bez uprawy przez okres zalecany w etykiecie użytego środka.	Chwasty trwałe powinny odrósnąć po zbiorze przedplonu (mieć wysokość co najmniej 10 cm). W przypadku konieczności wapnowania wykonać je przed tym zespołem upraw.
Orka przedzimowa	Wskazany termin – druga dekada października. Orka głęboka (25–30 cm) dobrze odwracająca skiby i wyrównana jednym przejazdem brony przed zimą.	Wyrównanie przedzimowe pozwala na płytszą uprawę wiosenną i wysoki podsiąk do płytko postających nasion.
Uprawa przedświeżna	Uprawę przedświeżną przygotowującą głębę do uprawy lucerny siewnej rozpocząć od bronowania i wyrównania wierzchniej warstwy roli. Bronowanie przerywa parowanie wody z gleby i zapobiega jej zaskorupieniu i zbrylenieniu. Bezpośrednio przed siewem wykonać uprawę przedświeżną na głębokość 5–6 cm przy użyciu agregatu złożonego z kultywatora i wału strunowego.	Uprawa przedświeżna powinna być wykonana po aplikacji nawozów. Głęboka uprawa przedświeżna wynika z konieczności głębszego umieszczenia ziarniaków rośliny ochronnej.
Nawożenie mineralne	Przedświeżne nawożenie mineralne powinno obejmować wymagania nawozowe rośliny ochronnej oraz samej lucerny i wynosić 60 kg N · ha <sup>-1</sup> , 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> · ha <sup>-1</sup> i 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . W latach pełnego użytkowania lucerny nawozić pogłównie jedynie fosforem i potasem w dawkach 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 100 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . Fosfor stosować w całości wiosną po ruszeniu wegetacji. Nawozy potasowe podzielić na dwie	Dane dotyczą gleb o średniej zasobności w przyswajalne formy fosforu i potasu. W przypadku gleb o niskiej zasobności wymagają wydatnego zwiększenia, a przy zasobności wysokiej – zmniejszenia. Przy niskiej zasobności dawkę fosforu należy zwiększyć o 50%, a potasu o 40%. Odwrotnie postąpić

cd. tabeli 9.14

1	2	3
	<p>dawki (<math>60 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{ha}^{-1}</math> po ruszeniu wegetacji, resztę po pierwszym pokosie). Azotu nie stosować – rośliny czerpią go w wyniku symbiozy z bakteriami brodawkowymi wiążącymi wolny azot atmosferyczny.</p>	<p>przy wysokiej zasobności i dawki te zmniejszyć o ten sam wskaźnik.</p>
<p>Material siewny, siew</p>	<p>Do założenia plantacji wykorzystać odmiany charakteryzujące się wysokim potencjałem produkcji biomasy i wysoką zimotrwałością, najlepiej krajowe. Doboru odmian należy dokonywać w oparciu o KR, korzystając z wyników PDOIR COBORU.</p> <p>Plantację lucerny zakładać jako jej wsiewkę w roślinę ochronną – owies. Siew przeprowadzić pod koniec drugiej dekady kwietnia, w ilości <math>13\text{--}15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math> nasion lucerny i <math>130 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math> ziaren owsa. Siew wykonać sposobem rozdzielczym, w tym samym dniu. Pierwszym wysiewanym komponentem powinien być owies w rozstawie <math>10\text{--}13 \text{ cm}</math>, na głębokość <math>4\text{--}5 \text{ cm}</math>. Materiał siewny owsa zaprawić odpowiednią zaprawą nasienną. Bezpośrednio po siewie owsa wykonać siew lucerny na głębokość <math>1,5 \text{ cm}</math>, w rzędy o rozstawie <math>10\text{--}13 \text{ cm}</math>. Bezpośrednio przed siewem nasiona lucerny zaprawić zaprawą nasienną przeciwdziałającą zgorzeli siewek i zaszcześcić nitraginą przeznaczoną dla lucerny. Po zakończeniu siewu obu komponentów pole zwałować.</p>	<p>Owies wysiać tradycyjnym siewnikiem, po wcześniejszym przygotowaniu roli, albo agregatem uprawowo-siewnym (doprawianie gleby i wysiew). Lucernę najlepiej wysiać w poprzek rzędów owsa.</p>
<p>Regulacja zachwaszczenia</p>	<p>Zasiewy lucerny w roślinę ochronną z reguły nie wymagają stosowania zabiegów pielęgnacyjnych. W wypadku silnego zachwaszczenia plantacji, podobnie jak w technologii konwencjonalnej, należy przeprowadzić chemiczną regulację zachwaszczenia zasiewów herbicydem selektywnym zarówno do rośliny ochronnej, jak i lucerny. Do niedawna krajowy rynek środków ochrony roślin dysponował preparatami zalecanymi do zwalczania chwastów dwuliściennych w zbożach z wsiewką lucerny (np. Chwastox Extra 300 SL z substancją czynną MCPA). W chwili obecnej brak jest środków dopuszczonych do stosowania w zbożach z wsiewką. W latach pełnego użytkowania wczesną wiosną po wysiewie nawozów mineralnych wykonać bronowanie plantacji.</p>	<p>W związku z brakiem środków chemicznych do zwalczania chwastów w roku zakładania plantacji, należy wykonać staranne odchwaszczenie w zespole upraw późniejszych.</p>

cd. tabeli 9.14

1	2	3
Zbiór biomasy	<p>W roku siewu zbiera się dwa pokosy (owsa na biomase i lucerny w formie ściernianki). Zbiór biomasy owsa wykonuje się na początku fazy wyrzucania wierz, a lucerny pod koniec września. Podczas zakiszania stosować preparaty chemiczne lub biologiczne ułatwiające zakiszanie i stabilizujące kiszonkę. W latach pełnego użytkowania lucerny najkorzystniej zbierać trzy pokosy – pierwszy w fazie pąkowania, drugi w fazie kwitnienia, a trzeci w fazie pąkowania, jednak nie później niż pod koniec września.</p> <p>Metoda zbioru biomasy zależy od dostępnego sprzętu. Najlepiej zbiór wykonać sieczkarnią samojezdną, która kosi i rozdrabnia biomase roślinną, i sporządzać kiszonkę. Można też kosić biomase na pokosy i pozostawiać do przeschnięcia, zgrabić zgrabniarkami na wałki i zbierać prasami zwijającymi w bele cylindryczne i sporządzać sianokiszonkę. Podszuszoną biomase można też zbierać przyczepami samozbierającymi wyposażonymi w przystawkę do cięcia biomasy na krótkie odcinki lub sieczkarniami samojezdnymi wyposażonymi w podbieracze pokosów i sporządzać kiszonki lub sianokiszonki. Lucerna należy do roślin trudno się zakiszających, dlatego do konserwacji biomasy należy stosować preparaty biologiczne lub chemiczne ułatwiające zakiszanie i stabilizujące kiszonkę.</p>	<p>Koszenie lucerny przeprowadzać na wysokości nie mniejszej niż 6–8 cm, aby nie uszkadzać szyjek korzeniowych. Unikać kosiarek opartych na białkowych aparatach tnących, które uszkadzają szyjki korzeniowe. W przypadku sporządzania sianokiszonek urządzenia koszące powinny być wyposażone w zgniatacze pokosów, które przyspieszają dosuszenie biomasy do wilgotności 30–40%.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.15  
Schemat wysokonakładowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy rutwicy wschodniej przeznaczzonej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 20,5–21,5 GJ

Ocult*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Rutwica należy do roślin poprawiających wartość stanowiska dla roślin następczych, dlatego najlepiej ją uprawiać po roślinach obniżających tę cechę, czyli po zbóżach ozimych lub jarych. Po zakończeniu użytkowania zostawia bardzo dobre stanowisko pod uprawę zbóż ozimych i jarych.	Okres użytkowania co najmniej pięć lat (niekiedy nawet do 7–8 lat). Z tego względu należy ją wyłączyć ze zmianowania i uprawiać na polu wypadającym z plodozmianu.
Uprawa późniwna roli	Stanowisko pod uprawę rutwicy wschodniej, ze względu na bardzo długi okres jej użytkowania i możliwość dalszego zachwasczenia, musi być wolne od chwastów trwałych. Jeżeli na polu występują takie gatunki chwastów należy po zbiorze przedplonu zastosować herbicyd oparty na glifosacie i pozostawić w takim stanie przez okres zalecany w etykiecie środka. Uprawę późniwną niszczącą ściernisko wykonać bezpośrednio po zbiorze przedplonu lub po minięciu czasu określonego w etykiecie środka, gdy zwalczane były chwasty trwałe. Do podorywki wykorzystać narzędzie dobre mieszające resztki późniwne z glebą (wszelkiego typu agregaty ścierniskowe i brony talerzowe wyposażone w wały dogniatające).	Zabieg opryskiwania glifosatem wykonać dwa tygodnie po zbiorze przedplonu na odrośnięte, zielone chwasty. W przypadku konieczności wapnowania zabieg ten wykonać przed tym zespolem upraw.
Orka przedzimowa	Wskazana jest głęboka (25–30 cm) orka przedzimowa wykonana w drugiej połowie października, lekko wyrównana przed zimą.	Wyrównanie przedzimowe pozwala na płytszą uprawę wiosenną i wysoki podsiąk do płytko posiadanych nasion.
Uprawa przedsięwna	Wiosenne zabiegi przygotowujące glebę do założenia plantacji rozpocząć od bronowania. Po wystawie nawozów mineralnych, przed siewem nasion wykonać płytką (3–4 cm) uprawę za pomocą biernego agregatu uprawowego zaopatrzonego w wał strunowy lub brony średniej.	Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym, zabieg uprawy przedsięwnej można pominąć.
Nawożenie mineralne	W roku zakładania plantacji na glebach średnio zasobnych w przyswajalne składniki pokarmowe wystarcza dawka 30 kg N, 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 90 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> stosowana bezpośrednio przed siewem. Azot w uprawie rutwicy zapewnia lepszy jej początkowy rozwój po w schodach. Najlepsze są formy szybko działające (np. w postaci saletry amonowej). W latach pełnego użytkowania rutwicy nawożenie mineralne ograniczyć	Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas zwiększyć dawkę o 30%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby i dawki tych składników zmniejszyć o te same wskaźniki. Korekty dawek tych składników wykonywać do

cd. tabeli 9.15

1	2	3
<p>1</p> <p>Material siewny, siew</p>	<p>do stosowania nawozów fosforowych i potasowych. Zabieg wykonywać wczesną wiosną, po wznowieniu wegetacji roślin. Na glebach średnio zasobnych w przyswajalne formy fosforu i potasu wystarczą dawki tych składników wynoszące 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> · ha<sup>-1</sup> i 120 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. Nawożenie azotem rutwicy jest zbędne ze względu na jej symbiozę z bakteriami <i>Rhizobium galegae</i>.</p> <p>Dobór odmian rutwicy wschodniej jest bardzo ograniczony ze względu na proces introdukcji tego gatunku na terenie Polski. Do uprawy najlepiej stosować polską odmianę Risa lub rosyjską Gale, które do tej pory z powodzeniem były testowane w krajowych warunkach klimatycznych.</p> <p>Plantację rutwicy wschodniej, ze względu na dużą wrażliwość roślin na zacieńanie w początkowych stadiach rozwojowych, najlepiej założyć w siewie bez rośliny ochronnej. Siew wykonać w trzeciej dekadzie kwietnia, w ilości 15 kg · ha<sup>-1</sup> nasion, na głębokość 2 cm, w rozstawie rzędów wynoszącej 20 cm. Do siewu użyć materiału siewnego poddanego procesowi skaryfikacji. Bezpośrednio przed siewem skaryfikowany materiał siewny zaprawić chemiczną zaprawą nasienną chroniącą młode siewki przed chorobami grzybowymi oraz zaszczerpić bakteriami <i>Rhizobium galegae</i>. Zaszczepienie nasion rutwicy odpowiednimi bakteriami brodawkowymi jest niezbędne z powodu jej symbiotycznego wiązania azotu z powietrza przez bakterie, które w warunkach naturalnych nie występują w polskich glebach. W przypadku niedostępności odpowiedniej do tego nitraginy nasiona zaprawione zaprawą nasienną wymieszać z 15–20 kg wysuszonej gleby pochodzącej z pola, gdzie wcześniej uprawiano rutwicę. Mieszankę nasion i gleby podczas siewu często przegarniać w siewniku, aby składniki nie uległy rozwarstwieniu. Po siewie pole zwalować.</p>	<p>uzyskania średnich zasobności gleby w przyswajalne formy fosforu i potasu.</p> <p>Nasiona nie skaryfikowane bezpośrednio przed siewem poddać temu procesowi. Najlepsze efekty daje skaryfikacja chemiczna (moczyć przez 15–25 minut w stężonym kwasie siarkowym). Po jej wykonaniu materiał siewny należy dobrze wypłukać w wodzie i wysuszyć.</p> <p>Szczepienie nasion nitraginą jest niezbędne, ponieważ bakterie symbiotyczne rutwicy wschodniej nie występują w Polskich glebach.</p>

cd. tabeli 9.15

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>Pielęgnacja plantacji w roku siewu polega na mechanicznym przykaszaniu chwastów, gdy ich wysokość o 15 cm przewyższa rośliny rutwicy. Wysokość koszenia 7–10 cm nad głębą. Ze względu na powolny początkowy rozwój roślin rutwicy, zabieg przykaszania chwastów powtórzyć po 3–4 tygodniach. W następnych latach użytkowania plantacji nie ma potrzeby przeprowadzania zabiegów pielęgnacyjnych, gdyż rutwica mocno rozrasta się w międzyrzędziach i zagłusza chwasty jednoroczne.</p>	<p>Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych herbicydów do ochrony rutwicy wschodniej. Jedyną dostępną metodą walki z zachwaszczeniem jest stosowanie mechanicznych zabiegów.</p>
Zbiór biomasy	<p>W roku założenia plantacji w siewie bez rośliny ochronnej rutwica wschodnia daje jeden pokos biomasy zbierany pod koniec września. W latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy jest zbiór trzech pokosów: pierwszy a początku kwitnienia, drugi w fazie pełni kwitnienia, a trzeci pod koniec września.</p> <p>Zbiór jednofazowy wykorzystany powinien być w gospodarstwach dużych. Do tego celu nadają się sieczkarnie samojezdne, które ścinają fitomase, rozdrabniają ją i ładują na przyczepy transportowe. Maszyny te, po zamontowaniu podbieracza, można również wykorzystywać do zbioru i cięcia zielonki podsuszonej na pokosach i uprzednio zgrabionej w szerokie wały.</p> <p>Biomase zakuśca się w pryzmach naziemnych lub w przejazdowych silosach. Biomase można też zbierać pokosów. Rośliny kosi się kosiarkami wyposażonymi w zgniatacz pokosów, zgrabia na wałki, które zbiera się za pomocą przyczep zbierających wyposażonych w przystawkę do cięcia fitomasy. Pociętą biomase zakuśca się na pryzmie naziemnej albo w silosie przejazdowym. Zakuścanie podsuszonego surowca można przeprowadzić też w belach cylindrycznych zrolowanych prasą zwijającą i szczelnie owiniętych folią. Podczas zakuścania należy stosować preparaty ułatwiające zakuścanie i stabilizujące kiszonkę.</p>	<p>W praktyce spotyka się najczęściej dwukrotny zbiór biomasy w roku. Z badań wynika, że zbiór trzech pokosów jest korzystny pod względem osiągniętego plonu fitomasy. Przy pierwszym pokosie ścinać rośliny na wysokości 8–10 cm, a następne pokosy nieco niżej – 6–8 cm.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.16

Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy rutwicy wschodniej przeznaczanej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 20,2–21,2 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Pod uprawę rutwicy wschodniej, podobnie jak pod inne rośliny motylkowe drobnonasienne, najlepsze są stanowiska po okopowych uprawianych na oborniku. Ze względu na duży udział zbóż w strukturze zasiewów, a mały roślin przerywających monokulturę zbóż, zasiewy rutwicy należy lokalizować po zbożach, ozimych lub jarych. Rutwica pozostawia po sobie bardzo dobre stanowisko pod uprawę zbóż (pszenicy na glebach dobrych i bardzo dobrych, pszenżyta na glebach słabszych).	Plantację można użytkować przez okres co najmniej pięciu lat (niekiedy nawet do 7–8 lat). Z tego względu należy ją wyłączać ze zmianowania i uprawiać na polu wypadającym z płodozmianu.
Uprawa późnina roli	Stanowisko pod uprawę rutwicy wschodniej musi być wolne od chwastów trwałych. Jeżeli na polu występują takie gatunki chwastów, należy wykonać opryskiwanie pola herbicydem totalnym na bazie s.a. glifosatu. Uprawę późnina czasu określonego w etykiecie środka, gdy przedplonu lub po minięciu czasu określonego w etykiecie środka, gdy zwalczane były chwasty trwałe. Do uprawy późnina wykorzystać narzędzie dobrze mieszające resztki późnina z glebą.	Opryskiwanie wykonać dwa tygodnie po zbiorze przedplonu na odrośnięte, zielone chwasty. W przypadku konieczności wapnowania wykonać je przed tym zespołem upraw.
Orka przedzimowa	Głęboka (25–30 cm), orka przedzimowa gwarantuje stworzenie dobrych warunków do rozwoju systemu korzeniowego rutwicy. Wykonana powinna być w drugiej połowie października i lekko wyrównana przed zimą.	Wyrównanie przedzimowe pozwala na płytszą uprawę wiosenną i wysoki podsiąk do płytko posiadanych nasion.
Uprawa przedziewna	Wiosenne zabiegi przygotowujące pole do założenia plantacji rutwicy powinny być jak najmniej energochłonne i ograniczać się do bronowania wykonanego po obeschnięciu pola. Bezpośrednio po wysiewie nawozów mineralnych i przed siewem nasion, gdy nie wykonuje się siewu agregatem uprawowo-siewnym, należy wykonać płytką (2–4 cm) uprawę przedziewną wykorzystując do tego celu agregat złożony z kultywatora z wałem strunowym.	Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym zabieg uprawy przedziewnej pominać.
Nawożenie mineralne	W roku założenia plantacji przedziewne nawożenie mineralne rutwicy na glebach średnio zasobnych w fosfor i potas powinno wynosić 40 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 60 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . Razem z fosforem i potasem zastosować azot w dawce 30 kg N · ha <sup>-1</sup> (najlepiej w formie szybko działającej).	Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę tego składnika zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas zwiększyć o 30%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby



cd. tabeli 9.16

1	2	3
	<p>W latach pełnego użytkowania plantację rutwicy nawozić wczesną wiosną jedyne fosforem i potasem. Na glebach ze średnią zasobnością w te składniki będą to dawki 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 90 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. Nawożenie azotem jest niewskazane ze względu na osłabienie symbiozy roślin z bakteriami brodawkowymi wiążącymi azot z powietrza.</p>	<p>i dawki tych składników zmniejszyć o te same wskaźniki. Korekty dawek wykonywać aż do uzyskania średnich zasobności gleby w przyswajalny fosfor i potas.</p>
<p>Materiał siewny, siew</p>	<p>Dobór odmian jest ograniczony, najlepiej stosować polską odmianę Risa lub rosyjską Gale, które do tej pory z powodzeniem były testowane w polskich badaniach.</p> <p>Rośliny rutwicy wschodniej są bardzo wrażliwe na zacienianie w początkowych stadiach wzrostu. Plantację więc najlepiej zakładać w siewie bez rośliny ochronnej. Siew wykonać w trzeciej dekadzie kwietnia, w ilości 15 kg · ha<sup>-1</sup> nasion, na głębokość 2 cm, w rozstawie rzędów wynoszącej 20 cm.</p> <p>Użyty materiał siewny musi być poddany procesowi skaryfikacji. Jeśli nasiona nie spełniają tego warunku, bezpośrednio przed siewem wykonać skaryfikację chemiczną (moczyć przez 15–25 minut w stężonym kwasie siarkowym). Po wykonaniu tej czynności materiał siewny dobrze wyplukać w wodzie i wysuszyć.</p> <p>Skaryfikowany materiał siewny zaprawić chemiczną zaprawą nasienną chroniącą młode siewki przed chorobami grzybowymi oraz zaszczyć bakteriami <i>Rhizobium galegae</i>. Brak odpowiedniego rodzaju nitraginy można zastąpić 15–20 kg · ha<sup>-1</sup> wysuszonej gleby pochodzącej z pola, gdzie wcześniej uprawiana była rutwica i mieszać z zaprawionym materiałem siewnym. Po siewie pole zwalować.</p>	<p>Szczepienie nasion nitraginą jest niezbędne, ponieważ bakterie symbiotyczne rutwicy wschodniej nie występują w warunkach naturalnych w polskich glebach.</p> <p>Mieszankę nasion i gleby podczas siewu często przegarniać w siewniku, aby składniki nie uległy rozwarstwieniu.</p>
<p>Regulacja zachwaszczenia</p>	<p>Pielęgnacja plantacji w roku siewu ogranicza się do mechanicznego przykaszania chwastów, gdy ich wysokość o 15 cm przewyższa rośliny rutwicy. Wolny początkowy rozwój roślin rutwicy wymusza powtórzenie zabiegu przykaszania chwastów po 3–4 tygodniach. W następnych latach użytkowania plantacji nie ma potrzeby przeprowadzania zabiegów pielęgnacyjnych, gdyż rutwica mocno rozrasta się w międzyrzędziach i zagłusza chwasty jednoroczne.</p>	<p>Obecnie w Polsce nie ma zarejestrowanych herbicydów do ochrony rutwicy wschodniej. Jedyną dostępną metodą walki z zachwaszczeniem w roku zakładania plantacji jest stosowanie mechanicznych metod odchwaszczających.</p>

cd. tabeli 9.16

1	<p>Ze względu na dynamikę rozwoju w roku założenia plantacji w siewie czystym rutwica wschodnia daje jeden pokos biomasy, który zbierany jest pod koniec września. W latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy jest zbiór trzech pokosów: pierwszy na początku kwitnienia, drugi w fazie pełni kwitnienia, a trzeci pod koniec września.</p> <p>Zbioru fitomasy można dokonać jednoetapowo lub dwuetapowo. Do zbioru jednoetapowego wykorzystuje się sieczkarnie samojezdne, które ścinają fitomasę, rozdrabniają i ładują na przyczepy transportowe. Z takiego surowca sporządza się kiszonki w pryzmach i silosach. Sieczkarnie samojezdne po zamontowaniu podbieracza można wykorzystywać do zbioru i cięcia podsuszonej biomasy w technologii dwuetapowej. Rośliny kosi się kosiarkami wyposażonymi w zgriatacz pokosów, podsusza, zgrabia na wałki, które zbiera się przy użyciu wyżej wymienionych sieczkarni lub przyczep zbierających wyposażonych w przystawkę do cięcia biomasy na 10 cm odcinki. Tak zbieraną fitomasę również zakiszać w pryzmach naziemnych lub przejezdnych silosach. Zakiszenie podsuszonego surowca można przeprowadzić też w belach cylindrycznych zrolowanych prasą zwijającą i szczelnie owiniętych folią. Do zakiszenia surowca z rutwicy należy stosować chemiczne lub biologiczne preparaty ułatwiające zakiszenie.</p>	3
Zbiór biomasy		<p>W praktyce dokonuje się dwukrotnego zbioru biomasy w ciągu roku. Z badań wynika, że zbiór trzech pokosów jest korzystniejszy pod względem osiąganego plonu fitomasy. Przy pierwszym pokosie ścinać rośliny na wysokości 8–10 cm, a następne pokosy nieco niżej – 6–8 cm.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.17  
Schemat wysokonaktadowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy mieszanek lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową przeznaczonych na biogaz

Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 26,2–28,2 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct* 1	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania 2	Uwagi 3
Wybór przedplonu	Mieszanki dobrze tolerują przedplony okopowe na oborniku, zbożowe (w tym kukurydzą) oraz stanowiska po trawach. W praktyce najczęściej umieszcza się je po zbożach. Należy unikać stanowisk po roślinach bobowych wieloletnich i strączkowych.	Mieszanki lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową w zmianowaniu mogą być uprawiane na tym samym polu dopiero po upływie 3–4 lat. Plantacje mieszanek należy w pełni użytkować przez trzy lata.
Uprawa późniwna roli	Rodzaj zabiegów późniwnych dostosować do rodzaju przedplonu. Okres po jego zbiorze powinien być wykorzystany na odchwasczenie pola, ewentualne wapnowanie. W stanowiskach zachwaszczonych gatunkami trwałymi po zbiorze rośliny przedplonowej należy wyeliminować uciążliwe chwasty, głównie perz włściwy. Skutecznie niszczą je herbicydy nieselektywne stosowane na ściernisko, gdy chwasty mają wysokość 10–15 cm. Bezpośrednio po wapnowaniu lub po upływie okresu karencji przewidzianej w etykiecie zastosowanego herbicydu totalnego wykonać uprawę późniwną, najlepiej agregatem do uprawy późniwniej lub broną talerzową. Narzędzia do uprawy późniwniej powinny być wyposażone w wały wyrównujące i dogniatające rolę. Stanowiska po trawach w uprawie polowej bezwzględnie opryskiwać herbicydem totalnym i po okresie przewidzianym w etykiecie środka wykonać pocięcie darni broną talerzową.	Herbicyd totalny stosować zgodnie z zaleceniami podanymi na etykiecie środka.
Orka przedzimowa	Ostatni jesienny zabieg uprawowy – orkę zięble – wykonać w drugiej połowie października na głębokość 25, a nawet 30 cm i wyrównać skibę na zimę. W przypadku przyorywania dużej ilości resztek późniwnych skibę dobrze odwrócić (zastosować odkładnice śrubowe lub półśrubowe).	Wyrównanie skib przed zimą sprzyja płytkiej, wyrównanej uprawie przedświeżnej i wysokiemu podsiągowi wody do nasion.
Uprawa przedświeżna	Bronowanie wykonać wczesną wiosną po obeschnięciu pola. Bezpośrednio po wysiewie nawozów mineralnych i przed siewem nasion, gdy nie wykonuje się siewu agregatem uprawowo-siewnym, należy wykonać płytka (2–4 cm) uprawę przedświeżną wykorzystując do tego celu kultywator z wałem strunowym.	Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym, zabieg uprawy przedświeżnej pominąć.

cd. tabeli 9.17

1	2	3
<p>Nawożenie mineralne</p>	<p>W roku zakładania plantacji na glebach o średniej zaobności w fosfor i potas zastosować 60 kg N, 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 120 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. W latach pełnego użytkowania plantacji na glebach charakteryzujących się średnią zasobnością bezpośrednio po wznowieniu wegetacji zastosować 90 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 120 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. W pierwszym roku pełnego użytkowania zastosować również 100 kg N · ha<sup>-1</sup> w dwóch dawkach. Dawkę pierwszą wynoszącą 50 kg N · ha<sup>-1</sup> zastosować po ruszeniu wegetacji, a drugą (również 50 kg N · ha<sup>-1</sup>) po pierwszym pokosie. W drugim roku pełnego użytkowania, ze względu na ustępowanie z runi komponentu motylkowatego, nawożenie azotem trzeba zwiększyć w stosunku do pierwszego roku o 20 kg N · ha<sup>-1</sup> (pierwsza dawka – 60 kg N · ha<sup>-1</sup> wczesną wiosną, a drugą identyczną dawkę po pierwszym pokosie). W trzecim roku prowadzenia plantacji każdą dawkę azotu zwiększyć o kolejne 10 kg N (łącznie 140 kg N · ha<sup>-1</sup>).</p>	<p>Azot zastosować w formie szybko działającej (najlepiej w postaci saletry amonowej). Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę tego składnika zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas zwiększyć o 30%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby i dawki tych składników zmniejszyć o te same wartości. Nawożenie można częściowo zastąpić gnojowicą i dawki składników NPK należy zbilansować.</p>
<p>Material siewny, siew</p>	<p>Do założenia plantacji mieszanek lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową przeznaczonych do produkcji biogazu wykorzystać odmiany bobowych i tymotki charakteryzujących się przede wszystkim wysokim potencjałem produkcji biomasy. Doboru odmian należy dokonywać w oparciu o KR, korzystając z wyników PDOiR COBORU. Plantację mieszanek koniczyny łąkowej z tymotką łąkową oraz lucerny siewnej z tymotką łąkową w technologii wysokonakładowej należy zakładać bez rośliny ochronnej. Siew obu komponentów mieszanki wykonać w drugiej dekadzie kwietnia, na głębokość 1,5 cm, w rozstawie rzędów wynoszącej 10–13 cm. Masa wysiewu dla mieszanki lucerny siewnej z tymotką wynosi 10 kg · ha<sup>-1</sup> nasion lucerny plus 5 kg · ha<sup>-1</sup> nasion tymotki łąkowej, a w przypadku mieszanki koniczynowo-trawiastej – 7,5 kg · ha<sup>-1</sup> nasion koniczyny łąkowej plus 5 kg · ha<sup>-1</sup> tymotki łąkowej. Do siewu wykorzystywać kwalifikowany materiał siewny, zaprawiony preparatem nasionną chroniącą młode siewki przed chorobami grzybowymi. Nasiona rośliny bobowatej dodatkowo zabezpieczyć właściwą dla danego gatunku nitratyną. Po siewie pole zwalować wałem gładkim.</p>	<p>Mieszankę nasion podczas siewu często przegaraniać w siewniku, aby składniki nie uległy rozwarstwieniu.</p>

cd. tabeli 9.17

1	2	3
<p>Regulacja zachwaszczenia</p> <p>Zbiór biomasy</p>	<p>Krajowy rynek środków chemicznych nie dysponuje obecnie herbicydami do zwalczania chwastów w zasiewach mieszanek motylkowo-trawianych, uprawianych zarówno bez rośliny ochronnej, jak i w siewie z rośliną ochronną. Z tego względu jedynym zabiegiem pielęgnacyjnym stosowanym na plantacjach w roku siewu jest przykaszanie roślin na wysokości 7–10 cm. Zabieg ten wykonywać jedynie w przypadku silnego zachwaszczenia plantacji. W latach pełnego użytkowania plantacji nie ma potrzeby wykonywania żadnych zabiegów pielęgnacyjnych.</p> <p>W roku siewu w sprzyjających warunkach atmosferycznych można zebrać dwa pokosy fitomasy, natomiast w latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy jest coroczny zbiór trzech pokosów. Pierwszy pokos zbierać w fazie początku kłoszenia tymotki, drugi w fazie początku kwitnienia rośliny bobowej, a ostatni w fazie pąkowania rośliny bobowej, lecz nie później niż do końca września.</p> <p>Biomasę po zbiorze najlepiej zakiszać. Technologia zbioru biomasy i zakiszenia zależy od posiadanego wyposażenia technicznego. Najszybszy jest bezpośredni zbiór siewkarnią samojezdną i cięcie fitomasy na krótkie odcinki oraz zakiszenie. Zbiór wieloetapowy polega na koszeniu roślin, zgrabianiu podsuszonej biomasy na wałki i zbieraniu przyczepami zbierającymi wyposażonymi w przystawki rozdrabniające. Przy zbiorze prasami zbijającymi w bele cylindryczne poszczególne bele należy owinać szczelnie folią. Biomasę roślinną zbieraną przy użyciu przyczep zbierających lub siewkarni samojezdnych zakiszać w przyzmach lub silosach przejazdowych. Zbiór wieloetapowy można również stosować do roślin podsuszonych, zawierających 30–40% suchej masy.</p>	<p>Obecnie w Polsce są dostępne herbicydy, które kiedyś były dopuszczone do odchwaszczania plantacji motylkowo-trawianych. Brak ich rejestracji wynika z wysokich kosztów związanych z rejestracją środków.</p> <p>Wysokość koszenia roślin nie powinna być niższa niż 6 cm.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.18

Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy mieszanek lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową przeznaczonych na biogaz

Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 23,2–24,8 GJ · ha<sup>-1</sup>

Ocult*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	<p>Mieszanki lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową należy uprawiać po okopowych na obroniku, zbożach (w tym kukurydzy) oraz trawach w uprawie polowej. Biorąc pod uwagę obecną strukturę zasiewów, należy umieszczać je po zbożach. Należy unikać stanowisk po roślinach bobowych wieloletnich i strączkowych.</p> <p>Uprawa poźniwna uzależniona jest od rodzaju przedplonu. W niezachwaszczonych stanowiskach po roślinach zbożowych (wylączając kukurydzę) należy wykonać zrywanie ścierni. Zachwaszczone stanowiska w pierwszej kolejności muszą być opryskane totalnym preparatem chwastobójczym i pozostawione przez okres podany na etykiecie środka. Po okresie karencji środka wykonać podorywkę.</p> <p>Po kukurydzy uprawianej na kiszonkę nie wykonywać zespołu upraw poźniwnych, natomiast po kukurydzy uprawianej na ziarno wykonać talerzowanie w celu wymieszania z głębią dużej ilości resztek poźniwnych. Stanowiska po trawach w uprawie polowej bezwzględnie opryskiwać herbicydem totalnym i po okresie przewidzianym na etykiecie środka wykonać cięcie darni przy użyciu brony talerzowej.</p>	<p>Mieszanki w zmianowaniu mogą być uprawiane na tym samym polu dopiero po upływie 3–4 lat. Plan-tacje mieszanek należy w pełni użytkować przez trzy lata.</p> <p>Herbicyd totalny stosować zgodnie z zaleceniami podanymi na etykiecie środka.</p>
Orka przedzimowa	<p>Ostatni jesienny zabieg uprawowy – orkę zieble – wykonać w drugiej połowie października na głębokość 25, a nawet 30 cm i wyrównać skibę na zimę. W przypadku przyorywania dużej ilości resztek poźniwnych skibę dobrze odwrócić (zastosować odkladnice śrubowe lub półśrubowe).</p>	<p>Wyrównanie skib przed zimą sprzyja płytkiej, wyrównanej uprawie przedświeżnej i wysokiemu pod-siągowi wody do nasion.</p>
Uprawa przedświeżna	<p>Bronowanie – wczesna wiosną po obeschnięciu pola. Bezpośrednio po wysiewie nawozów mineralnych i przed siewem nasion, gdy nie wykonuje się siewu agregatem uprawowo-siewnym należy wykonać płytką (5–6 cm) uprawę przedświeżną wykorzystując do tego celu kultywator z wałem struno-wym.</p>	<p>Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym, zabieg uprawy przedświeżnej pominać.</p>

cd. tabeli 9.18

1	2	3
<p>Nawożenie mineralne</p> <p>Materiał siewny, siew</p>	<p>W roku założenia plantacji nawozy mineralne stosować bezpośrednio przed siewem. Na glebach średnio zasobnych w fosfor i potas dawki tych składników wynoszą: 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 100 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. Z powodu wstępnego mieszanek w owies zastosować też nawożenie azotem w dawce 60 kg N · ha<sup>-1</sup>. W latach pełnego użytkowania nawozy fosforowo-potasowe aplikować bezpośrednio po wznowieniu wegetacji w dawkach wynoszących 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> i 90 kg K<sub>2</sub>O · ha<sup>-1</sup>. Nawożenie azotem (80 kg N · ha<sup>-1</sup>) należy stosować w dwóch dawkach. Dawkę pierwszą (40 kg N · ha<sup>-1</sup>) po ruszeniu wegetacji, a drugą (40 kg N · ha<sup>-1</sup>) po pierwszym pokosie W drugim i trzecim roku użytkowania dawki azotu należy zwiększyć do 50 kg N · ha<sup>-1</sup> i stosować w powyższych terminach.</p> <p>Odmiany do mieszanek lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową do produkcji biomasy przeznaczanej na biogaz powinny charakteryzować się wysokim potencjałem produkcji suchej masy. Doboru odmian należy dokonywać w oparciu o KR, korzystając z wyników PDOiR COBORU.</p> <p>W technologii średnioakładowej plantację mieszanek motylkowo-trawiatych zakładać jako wsiewkę w roślinie ochroną (owies zbierany na zielonkę – wysiew 120 kg · ha<sup>-1</sup> ziarna). Siew wykonać w drugiej dekadzie kwietnia. Mieszanek lucerny siewnej z tymotką łąkową wysiewać w proporcji 10 kg · ha<sup>-1</sup> nasion lucerny + 5 kg · ha<sup>-1</sup> tymotki. Mieszanek koniczynowo-trawiatą wysiać w ilości 7,5 kg · ha<sup>-1</sup> nasion koniczyny łąkowej + 5 kg · ha<sup>-1</sup> tymotki łąkowej. Materiał siewny każdego komponentu powinien być zaprawiony zaprawą nasienną, a nasiona rośliny motylkowej dodatkowo zaszczepione odpowiednim szczepem nitraginy. Siew wykonać dwoma oddzielnymi przejazdami siewnika. Jako pierwszy komponent wysiewa się owies na głębokość 4–5 cm, w rozstawie 10–13 cm. W drugim przejeździe siewnika, wykonywanym w poprzek rzędów owsa, wysiewa się mieszanek, w tej samej rozstawie co roślina ochronna, lecz płycej – na głębokość ~2 cm. Po siewie pole zwalować.</p>	<p>Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę tego składnika zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas jego dawkę zwiększyć o 30%. Odwrótnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby i dawki tych składników zmniejszyć o te same wartości. Nawożenie można częściowo zastąpić gnojowicą i dawki składników NPK należy zbilansować.</p> <p>Mieszanek nasion podczas siewu często przegarzać w siewniku, aby składniki nie uległy rozwarstwieniu.</p>

cd. tabeli 9.18

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>Plantacje motylkowo-trawiaсте prowadzone w technologii integrowanej nie wymagają stosowania zabiegów pielęgnacyjnych, ponieważ roślina ochronna stanowi konkurencję dla chwastów. Nie ma dopuszczonych herbicydów do stosowania w zbożach z wsiewką.</p> <p>W latach pełnego użytkowania na plantacji nie ma potrzeby wykonywania żadnych zabiegów pielęgnacyjnych.</p>	<p>Obecnie w Polsce są dostępne herbicydy, które kiedyś były dopuszczone do stosowania w zbożach z wsiewką. Brak ich rejestracji wynika z wysokich kosztów związanych z ponowną rejestracją środków.</p>
Zbiór biomasy	<p>W roku zakładania plantacji zbiera się dwa pokosy biomasy. Pierwszy pokos obejmuje zbiór owsa w fazie wyrzucania wiech, a pokos drugi – mieszanekę (jako tzw. ściermiankę) pod koniec września.</p> <p>W latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy jest zbiór trzech pokosów: pierwszy pokos w fazie początku kłoszenia tymotki, drugi w fazie początku kwitnienia rośliny bobowej, a ostatni w fazie pąkowania rośliny motylkowej, lecz nie później niż do końca września.</p> <p>Z pozyskanej biomasy można sporządzać kiszonki lub sianokiszonki w technologii jedno- lub wieloetapowej. Najszybszy jest zbiór jednoetapowy wykonywany sieczkarnią samojezdną. Z tak pozyskanej biomasy sporządza się kiszonkę. Zbiór wieloetapowy składa się z koszenia roślin kosiarzkami, zgrabianiu biomasy na walki i zbieraniu przyczepami zbierającymi wyposażonymi w przystawki rozdrabniające, sieczkarniami samojezdnymi z podbieraczami pokosów lub prasami związującymi rolującymi biomasę w bele. Przy zbiorze prasami rolującymi poszczególne bele należy owinać szczeblnie folią. Z materiału roślinnego zbieranego technologią wieloetapową można sporządzać kiszonki lub sianokiszonki (zawierające 30–40% suchej masy).</p>	<p>Wysokość koszenia roślin nie powinna być niższa niż 6 cm.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne



Tabela 9.19  
Schemat wysokonakładowej (konwencjonalnej) technologii produkcji biomasy kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej przeznaczonych na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 28,2–29,2 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct* 1	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania 2	Uwagi 3
Wybór przedplonu	Trawy nie mają specjalnych wymagań pod względem stanowiska, więc można je uprawiać po wszystkich przedplonach. Stanowisko musi być wolne od chwastów (brak czasu na walkę z chwastami – siew letni).	Plantację kupkówki pospolitej w pełni użytkować przez 4 lata, tymotkę łąkową – o rok krócej.
Orka siewna	Orkę siewną (tzw. razówkę) wykonać jak najszybciej po zbiorze przedplonu na głębokość ok. 20 cm. Bezpośrednio po wykonaniu orki pole zwalować wałem wglębnym (np. Campbell).	Zastosowanie wału wglębnego przyspiesza osiada- nie roli.
Uprawa przed-siewna	Sprowadza się do płytkiej (2–3 cm) uprawy broną lub agregatem złożonym z kultywatora i wału strunowego. Wykonywana jest po wysiewie nawozów mineralnych.	Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym, zabieg uprawy przed-siewnej pominać.
Nawożenie mineralne	Przed założeniem plantacji (pod orkę siewną) wysiać nawozy mineralne (20 kg N, 60 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 90 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> ). W pierwszym roku pełnego użytkowania, wiosną po ruszeniu wegetacji zastosować 60 kg N · ha <sup>-1</sup> . Nawozów fosforowo-potasowych nie stosować, ponieważ zostały one już zastosowane jesienią w roku zakładania plantacji. W drugim i kolejnych latach pełnego użytkowania wczesną wiosną stosować 60 kg N, 80 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 120 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . W latach pełnego użytkowania po pierwszym i drugim pokosie nawozić azotem (po 30 kg N · ha <sup>-1</sup> ). Zabieg ten wykonać nie później niż tydzień po zbiorze biomasy. Azot zastosować w formie szybko działającej (najlepiej w postaci saletry amonowej).	Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę tego składnika zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas zwiększyć o 30%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby i dawki tych składników zmniejszyć o te same wartości. Nawożenie można częściowo zastąpić gnojowicą i dawki składników NPK należy zbilansować.
Materiał siewny, siew	Plantację kupkówki pospolitej lub tymotki łąkowej w konwencjonalnej technologii należy zakładać bez rośliny ochronnej w trzeciej dekadzie sierpnia. Masa wystawu nasion kupkówki pospolitej wynosi 22 kg · ha <sup>-1</sup> , a tymotki łąkowej 13 kg · ha <sup>-1</sup> . Nasiona wysiać na głębokość 1,5 cm, w rozstawie rzędów wynoszącej 10 cm. Bezpośrednio po siewie pole zwalować wałem gładkim w celu poprawienia warunków wschodów.	Siew musi być poprzedzony wysiewem nawozów mineralnych.

cd. tabeli 9.19

1	2	3
Regulacja zachwaszczenia	<p>Plantacje z reguły nie wymagają stosowania zabiegów pielęgnacyjnych. W pierwszym roku pełnego użytkowania w warunkach dużego zachwaszczenia, głównie gatunkami roślin dwuliściennych, na przelomie kwietnia i maja wykonać chemiczne zwalczanie chwastów herbicydami dopuszczonymi do stosowania w trawach.</p>	<p>Należy przestrzegać zaleceń podanych na etykiecie środka.</p>
Zbiór biomasy	<p>W roku siewu nie otrzymuje się plonu biomasy. W latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy, tak pod względem uzyskanego plonu biomasy, jak i jednostkowej wydajności biogazu, jest trzykrotny zbiór fitomasy w każdym roku. Pierwszy pokos zbierać w fazie kłoszenia traw, drugi po upływie 6-7 tygodni (nie później niż w ostatniej dekadzie lipca), a ostatni w trzeciej dekadzie września. Pod względem technologicznym zbiór i zakiszanie biomasy odbywa się podobnie jak w przypadku rutwicy, lucerny i mieszanek motylkowo-trawiaстых. Podczas zakiszania fitomasy można zrezygnować ze stosowania preparatów ułatwiających zakiszanie i stabilizowanie kiszonki.</p>	<p>Koszenie wykonać na wysokości ok. 6 cm nad powierzchnią gleby.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne.

Tabela 9.20  
Schemat średnionakładowej (integrowanej) technologii produkcji biomasy kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej przeznaczonej na biogaz  
Poziom nakładów skumulowanej energii na produkcję = 24,3–25,3 GJ · ha<sup>-1</sup>

Oct*	Opis zabiegów, uwarunkowania i termin wykonania	Uwagi
1	2	3
Wybór przedplonu	Trawy można uprawiać po wszystkich przedplonach. Najlepiej uprawiać je po zbożach.	Plantację kupkówki pospolitej w pełni użytkować przez 4 lata, tymotkę łąkową – o rok krócej.
Uprawa późniwna roli	Stanowiska zachwaszczone gatunkami rozlogowymi w pierwszej kolejności muszą być opryskane totalnym preparatem chwastobójczym na bazie glifosatu i pozostawione przez okres podany w etykiecie środka. Dopiero po okresie pełnego działania preparatu zerwać płytko ściern i wymieszać z wierzchnią warstwą gleby. Stanowiska po trawach bezwzględnie opryskiwać herbicydem totalnym i po okresie przewidzianym na etykiecie środka wykonać talerzowanie w celu porozrywania i pocięcia darni.	Herbicyd totalny stosować zgodnie z zaleceniami podanymi na etykiecie środka.
Orka przedzimowa	Ostatni, jesienny zabieg uprawowy – orkę zięblę – wykonać w drugiej połowie października na głębokość 25, a nawet 30 cm i wyrównać skibę na zimę. W przypadku przyorywania dużej ilości resztek pożniwnych skibę dobrze odwrócić (zastosować odkładnice śrubowe lub półśrubowe).	Wyrównanie skib przed zimą sprzyja płytkiej, wyrównanej uprawie przedzimowej i wysokiemu podsiąkowi wody do nasion.
Uprawa przedzimowa	Wiosną pierwszym zabiegiem przygotowującym glebę do siewu jest bronowanie. Wyrównuje ono wierzchnią warstwę roli i przerywa parowanie wody z gleby. Po wysiewie nawozów mineralnych wykonać uprawę przedzimową na głębokość 4–6 cm przy pomocy brony lub agregatu uprawowego.	Jeśli siew nasion wykonywany jest agregatem uprawowo-siewnym, zabieg uprawy przedzimowej pominać.
Nawożenie mineralne	Przedzimowe nawożenie mineralne powinno obejmować wymagania nawozowe rośliny ochronnej oraz traw. Na glebach ze średnią zasobnością w składniki pokarmowe powinno wynosić 70 kg N, 70 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 100 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . W latach pełnego użytkowania na glebach o średniej zasobności, wiosną po ruszeniu wegetacji zastosować 30 kg N, 50 kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> i 80 kg K <sub>2</sub> O · ha <sup>-1</sup> . Po zbiorze pierwszego i drugiego pokosu dodatkowo nawozić azotem (po 30 kg N · ha <sup>-1</sup> ). Azot stosować w formie szybko działającej (najlepiej w postaci saletry amonowej). Zabieg ten wykonać nie później niż tydzień po zbiorze biomasy.	Przy niskiej zasobności gleby w przyswajalny fosfor dawkę tego składnika zwiększyć o 40%, a przy niskiej zasobności w potas zwiększyć o 30%. Odwrotnie postąpić przy wysokiej zasobności gleby i dawki tych składników zmniejszyć o te same wartości. Nawożenie można częściowo zastąpić gnojowicą i dawki składników NPK należy zbilansować.

cd. tabeli 9.20

1	2	3
Materiał siewny, siew	<p>Plantację założyc metodą wsiewki traw w owies jako roślinę ochronną. Siew wykonac na przełomie drugiej i trzeciej dekady kwietnia. Masa wysiewu ziarna owsa wynosi <math>130 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math>, a kupkowi pospolitej – <math>22 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math> nasion (tymotki łąkowej – <math>13 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}</math>). Siew wykonac sposobem rozłącznym w tym samym dniu. Pierwszym wysiewanym komponentem powinny być owies (w rzędy o rozstawie 10–13 cm, na głębokość 4–5 cm), którego materiał siewny zaprawić odpowiednią zaprawą nasienną. Nasiona trawy wysiać w poprzek rzędów owsa (głębokość – 1,5 cm, rozstawa redlic – 10 cm). Po siewie obu komponentów pole zwalować wałem gładkim.</p>	<p>Komponent o większych nasionach i głębszym siewie musi być wystawiany jako pierwszy.</p>
Regulacja zachwaszczenia	<p>Plantacje traw wysiewane w roślinę ochronną z reguły nie wymagają stosowania zabiegów pielęgnacyjnych. Niestety nie ma dopuszczonych herbicydów do zwalczania chwastów w zbożach z wsiewką traw. Pozostaje tylko eksperymentowanie ze środkami dopuszczonymi do zwalczania chwastów w siewie monogatunkowym zboż na wyłączną odpowiedzialność plantatora.</p>	<p>Obecnie w Polsce są dostępne herbicydy, które kiedyś były dopuszczone do stosowania w zbożach z wsiewką.</p>
Zbiór biomasy	<p>W roku zakładania plantacji uzyskuje się dwa zbiory fitomasy (owsa i ściernianki). Zbiór owsa wykonac w fazie dojrzałości mleczno-woskowej, a ściernianki pod koniec września.</p> <p>W latach pełnego użytkowania najkorzystniejszy jest trzykrotny zbiór biomasy: pierwszy pokos w fazie kłoszenia traw, drugi po upływie 6–8 tygodni (nie później niż w ostatniej dekadzie lipca), a ostatni w trzeciej dekadzie września. Pod względem technologicznym zbiór i zakiszenie biomasy odbywa się podobnie jak w przypadku rutwicy, lucerny i mieszanek motylkowo-trawiających. Podczas konserwacji biomasy, ze względu na łatwiejsze jej zakiszenie, można zrezygnować ze stosowania preparatów biologicznych i chemicznych ułatwiających zakiszenie i stabilizowanie kiszonki.</p>	<p>Wysokość koszenia roślin traw nie powinna być niższa niż 6 cm.</p>

\*Oct – Operacje i czynności technologiczne

Tabela 9.21

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy lucerny siewnej przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	–	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL; John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	–	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym Vaderstad Carrier CR 350 + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/3
8	siew lucerny	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/3
9	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/3
10	przykaszanie plantacji	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	V/3
11	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VII/3
12	prze-trząsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VII/3
13	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	–	VII/3

cd. tabeli 9.21

1	2	3	4	5	6	7
14	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
15	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
16	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
17	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
18	przetwarzanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetwarzacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
19	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
20	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
21	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
22	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	Rozsiewacz nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	-	IV/1
3	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
4	przetwarzanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetwarzacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
5	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
6	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3

cd. tabeli 9.21

1	2	3	4	5	6	7
7	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
8	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
9	nawożenie mineralne	Rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	V/3
10	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
11	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
12	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
13	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
14	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
15	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
16	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
17	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
18	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
19	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
20	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
21	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.22

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji biomasy lucerny siewnej przeznaczonej na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność W <sub>07</sub> agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	–	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	–	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/2
8	siew rośliny ochronnej	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/2
9	siew lucerny	Zetor Proxima Power 100 + Siewnik Poznaniak 410/3	13	1	–	IV/2
10	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/2
11	koszenie rośliny ochronnej	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VI/3
12	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VI/3
13	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabniarka Samasz Z2-780	55	1	–	VI/3



cd. tabeli 9.22

1	2	3	4	5	6	7
14	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VI/3
15	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VI/3
16	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VI/3
17	koszenie ściernianki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
18	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
19	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
20	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
21	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
22	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	-	IV/1
3	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
4	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
5	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
6	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3

cd. tabeli 9.22

1	2	3	4	5	6	7
7	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
8	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
9	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	V/3
10	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
11	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
12	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
13	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
14	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
15	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
16	koszenie lucerny	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
17	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
18	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
19	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
20	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
21	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.23

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy rutwicy wschodniej przeznaczony na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenżyto ozime

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	-	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	-	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	-	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	-	X/2
5	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	-	X/2
6	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	-	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/3
8	siew rutwicy	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	-	IV/3
9	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	-	IV/3
10	przykaszanie plantacji	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
11	przykaszanie plantacji	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VI/3
12	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	36	1	-	IX/3
13	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	55	1	-	IX/3

cd. tabeli 9.23

1	2	3	4	5	6	7
14	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	12	1	-	IX/3
15	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
16	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	10	1	-	IX/3
17	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	20	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiwacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
8	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
9	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
10	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
11	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3

cd. tabeli 9.23

1	2	3	4	5	6	7
12	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
13	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach eoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
14	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
15	przetwarzanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetwarzacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
16	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
17	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
18	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
19	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach eoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.24

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji biomasy rutwicy wschodniej przeznaczanej na biogaz

areał – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenżyto ozime

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz połowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	-	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	-	IX/1

cd. tabeli 9.24

1	2	3	4	5	6	7
3	uprawa poźniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plug 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8 polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/3
8	siew rutwicy	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/3
9	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/3
10	przykaszanie plantacji	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	V/3
11	przykaszanie plantacji	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VI/3
12	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	36	1	–	IX/3
13	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	55	1	–	IX/3
14	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabniarka Samasz Z2-780	12	1	–	IX/3
15	zwijanie bel cylin- drycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	–	IX/3
16	owijanie bel cylin- drycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	10	1	–	IX/3
17	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	20	2	–	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/1
2	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	V/3

cd. tabeli 9.24

1	2	3	4	5	6	7
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
8	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
9	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
10	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
11	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
12	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
13	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
14	koszenie rutwicy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
15	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
16	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
17	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
18	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
19	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.25

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji biomasy mieszanek lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową przeznaczonych na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	–	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	–	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4-skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8-polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/2
8	siew mieszanki	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/2
9	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/2
10	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VII/2
11	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VII/2
12	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	–	VII/2
13	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	–	VII/2



cd. tabeli 9.25

1	2	3	4	5	6	7
14	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/2
15	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/2
16	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
17	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
18	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
19	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
20	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
21	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	1	-	V/3

cd. tabeli 9.25

1	2	3	4	5	6	7
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	V/3
9	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
10	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
11	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
12	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
13	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
14	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
15	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
16	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
17	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
18	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
19	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
20	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.26

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji lucerny siewnej i koniczyny łąkowej z tymotką łąkową przeznaczonych na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	–	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	–	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4 skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8 polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8 polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/2
8	siew rośliny ochronnej	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/2
9	siew mieszanki	Zetor Proxima Power 100 + Siewnik Poznaniak 410/3	13	1	–	IV/2
10	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/2
11	koszenie rośliny ochronnej	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VI/3
12	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VI/3

cd. tabeli 9.26

1	2	3	4	5	6	7
13	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VI/3
14	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VI/3
15	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VI/3
16	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VI/3
17	koszenie ściernianki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
18	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
19	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
20	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
21	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
22	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3

cd. tabeli 9.26

1	2	3	4	5	6	7
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	V/3
9	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
10	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
11	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
12	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
13	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
14	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
15	koszenie mieszanki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
16	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
17	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
18	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
19	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
20	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.27

Karta technologiczna wysokonakładowej technologii produkcji kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej przeznaczonych na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	orka siewna	plóg 4 skibowy Kverneland 150 S + Wał Campbella SOLO 2,0 + John Deere 6630	8	1	–	VIII/2
2	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	VIII/2
3	siew nasion	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	VIII/2
4	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors 2,75	16	1	–	VIII/2
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/1
2	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VI/1
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VI/1
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	–	VI/1
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	–	VI/1
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	–	VI/1
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	–	VI/1

cd. tabeli 9.27

1	2	3	4	5	6	7
8	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	VI/1
9	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
10	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
11	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
12	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
13	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
14	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
15	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	VII/3
16	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
17	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
18	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
19	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
20	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
21	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

Tabela 9.28

Karta technologiczna średnionakładowej technologii produkcji kupkówki pospolitej i tymotki łąkowej przeznaczonych na biogaz

areal – 20 ha

plon główny – biomasa z całych roślin

przedplon – pszenica ozima

plon uboczny – brak

Numer czynności	Rodzaj czynności	Skład agregatu: rodzaj i typ maszyny lub narzędzia, liczba koni, typ ciągnika	Wydajność $W_{07}$ agregatu na dzień (8 godzin)	Potrzebna w ciągu dnia liczba		Miesiąc i dekada wykonania czynności
				ciągników	maszyn specjalnych	
1	2	3	4	5	6	7
W roku zakładania plantacji						
1	opryskiwanie	opryskiwacz polowy Pilmet Plus 2500 + Zetor Proxima Power 100	56	1	–	VIII/2
2	wapnowanie	Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL, John Deere 6630 + rozsiewacz wapna RCW 3	16	2	–	IX/1
3	uprawa późniwna	talerzowy agregat podorywkowy z wałem blaszanym – Vaderstad Carrier CR 350, szer. rob. 3,5 m + John Deere 6630	32	1	–	IX/1
4	orka przedzimowa	plóg 4 skibowy Kverneland 150 S + John Deere 6630	8	1	–	X/2
5	bronowanie	brona 8 polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	X/2
6	bronowanie	brona 8 polowa pojedyncza + John Deere 6630	40	1	–	IV/1
7	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	–	IV/2
8	siew rośliny ochronnej	Zetor Proxima Power 100 + agregat Ares L + Siewnik Poznaniak 410/3	12	1	–	IV/2
9	siew nasion	Zetor Proxima Power 100 + Siewnik Poznaniak 410/3	13	1	–	IV/2
10	wałowanie	Zetor Proxima Power 100 + wał gładki Mors	16	1	–	IV/2
11	koszenie rośliny ochronnej	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	–	VI/3
12	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	–	VI/3
13	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabniarka Samasz Z2-780	55	1	–	VI/3



cd. tabeli 9.28

1	2	3	4	5	6	7
14	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VI/3
15	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VI/3
16	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VI/3
17	koszenie ściernianki	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
18	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
19	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
20	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
21	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
22	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3
W latach pełnego użytkowania						
1	nawożenie mineralne	rozsiewacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	IV/1
2	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	V/3
3	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	V/3
4	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	V/3
5	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	V/3
6	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	V/3

cd. tabeli 9.28

1	2	3	4	5	6	7
7	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	V/3
8	nawożenie mineralne	rozsiwacz do nawozów Amazone ZA-M 2201 + John Deere 6630; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	120	2	-	V/3
9	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	VII/3
10	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	VII/3
11	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	VII/3
12	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	VII/3
13	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	VII/3
14	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	VII/3
15	koszenie biomasy	John Deere 6630 + Kosiarka Samasz KT 301	20	1	-	IX/3
16	przetrzęsanie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Przetrzęsacz Pronar PWP 530	36	1	-	IX/3
17	zgrabianie biomasy	Zetor Proxima Power 100 + Zgrabiarka Samasz Z2-780	55	1	-	IX/3
18	zwijanie bel cylindrycznych	John Deere 6630 + Prasa zwijająca Vicon RV 1602	12	1	-	IX/3
19	owijanie bel cylindrycznych folią	Zetor Proxima Power 100 + Owijarka samozaładowcza Metal-Fach Z 577	12	1	-	IX/3
20	transport biomasy	John Deere 6630 + 2x przyczepa Metalfach ecoline 10; Zetor Proxima Power 100 + Ładowacz TL 220 SL	10	2	-	IX/3

## 10. Literatura

1. Adamovics A., Dubrovskis V., Plume I. 2009. *Biogas production from energy grasses*. Grassland Science in Europe, 14: 339–341.
2. Akram A., Fatima M., Ali S., Gilani G., Asghar G. 2007. *Growth, field and nutrients uptake of sorghum in response to integrated phosphorus and potassium management*. Pak. J. Bot., 39(4): 1083–1087.
3. Aldrich S.R., Scott O.W., Leng E.R. 1982. *Modern corn production*. Illinois 61820: 1–378.
4. Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Zollitsch W., Mayer K., Gruber L. 2007. *Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 118: 173–182.
5. Arseniuk E., Warzecha R., Żurek M., Siódmiak J. 2012. *Postęp genetyczny i hodowla odmian kukurydzy dla różnych kierunków wykorzystania*. W: *Kukurydza i sorgo – produkcja, wykorzystanie, rynek*. Poznań.
6. Ashbell G., Weinberg Z.G. 1999. *Silage from tropi cal cereales and forage crops*. FAO Plant Production And Protection Paper 161. Proceedings of the FAO Electronic Conference on Tropical Silage 1 IX – 15 XII 1999, <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/gp/SILAGE/HTML/Paper7.html> (dostęp: 18.11.2012).
7. Augustyńska-Grzymek L., Goraj L., Jarka S., Pokrzywa T., Skarżyńska A. 2000. *Metodyka liczenia nadwyżki bezpośredniej i zasady typologii gospodarstw rolniczych (według standardów Unii Europejskiej)*. Fundacja Programów Pomocy dla Rolnictwa (FAPA). Warszawa.
8. Aurangzaib M. 2012. *Performance evaluation of nine varieties of Miscanthus in Iowa*. Iowa State University.
9. Balcerak M., Gierszewski W. 2010. <<http://www.kpodr.pl/index.php/produkcja-rolinna/42-inne/265-killka-sow-o-sorgo>> (dostęp: 4.01.2013).
10. Banasiak J. 1999. *Agrotechnologia*. Wyd. Nauk. PWN. Warszawa – Wrocław.
11. Banasiak J. 2004. *Projektowanie i ocena ekonomiczna procesów agrotechnologicznych*. Wyd. AR. Wrocław.
12. Barbanti L., Grandi S., Vecchi A., Venturi G. 2006. *Sweet and fibre sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench), energy crops In the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads*. Eur. J. Agron., 25: 30–39.
13. Barszczewski J., Wasilewski Z., Jankowska-Huflejt H., Wróbel B. 2009. *Stan i perspektywy wykorzystania trwałych użytków zielonych w Polsce*. Studia i Raporty. IUNG-PIB, 17: 59–71.
14. Bartkowiak A. 2010. *Opracowanie sektorowego planu działań określającego obszary współpracy w ramach partnerstwa „Methane to markets” w zakresie zmniejszenia metanu z rolnictwa*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Poznań: 1–37.
15. Baserga U. 1998. FAT-Berichte, 512: *Landwirtschaftliche Co-Verarbeitungs Biogasanlagen. Biogas aus organischen Reststoffen und Energiegras*. Tänikon, Switzerland: Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT): 1–12.
16. Bassam N.E. 1996. *Renewable energy. Potential crops for Europa and the Mediterranean region*. Federal Agricultural research center (FAL). Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome.
17. Bassam N.E. 2010. *Handbook of bioenergy crops*. Earthscan Ltd. London: 1–515.
18. Bawolski S. 1982. *Porównanie plonowania koniczyny czerwonej i jej mieszanek z trawami w zależności od poziomu nawożenia azotem i warunków siedliskowych*. Pam. Puł., 78: 97–109.
19. Bednarek W. 2011. *Oddziaływanie nawożenia mineralnego na plonowanie tymotki łąkowej*. Acta Agrof., 17(2): 267–275.
20. Belfield S., Brown C. 2008. *Field Crop Manual: Maize. A Guide to Upland Production in Cambodia*. University of Canberra.
21. Benedycka Z., Bobrzecka D., Bowszys T., Koc J., Panak H., Sienkiewicz S., Zawartka L. 1995. *Przewodnik metodyczny do ćwiczeń z chemii rolnej*. Olsztyn: 1–242.
22. Beres P. K., Pruszyński G. 2008. *Ochrona kukurydzy przed szkodnikami w produkcji integrowanej*. Acta. Sci. Pol. Agricultura, 7/4: 19–32.
23. Beres P.K. 2012. *Chemiczna ochrona kukurydzy przed szkodnikami w 2012 roku*. Kukurydza, 1(40) 12: 49–51.

24. Bobrecka-Jamro D., Szponar-Krok E. 1999. Wpływ zróżnicowanego nawożenia wapniowo-magnezowego na skład chemiczny mieszanki rutwicy wschodniej z tymotką łąkową. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln., 468: 103–108.
25. Bogucka B., Szempliński W., Wróbel E. 2008. Reakcja kukurydzy ziarnowej na nawożenie azotem w warunkach Północno-Wschodniej Polski. Mat. Konf. Nauk. „Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo”. UP Poznań: 44–46.
26. Borawska-Jarmulowicz B. 2011a. Zdolność reprodukcyjna odmian *Dactylis glomerata* w zależności od rozstawy rzędów w okresie czteroletniego użytkowania. Łąk. Pol., 14: 9–21.
27. Borawska-Jarmulowicz B. 2011b. Zróżnicowanie morfologicznych i biologicznych cech odmian *Dactylis glomerata* w uprawie na nasiona na tle warunków pogodowych. Łąk. Pol., 14: 23–41.
28. Borkowska H., Styk B. 2003. *Ślaziowiec pensylwański*. [W:] *Rośliny energetyczne*. Red. K. Kościk. AR, Lublin: 79–95.
29. Borowiecki J. 1994. Porównanie plonowania mieszanek lucerny z trawami w zależności od sposobu siewu i nawożenia azotem. Pam. Puł., 105: 89–100.
30. Borowiecki J. 2000. Mieszanki roślin motylkowatych z trawami w polowej produkcji pasz. Post. Nauk Roln., 1: 83–94.
31. Borowiecki J. 2002. *Trawy pastewne uprawy polowej. Instrukcja upowszechnieniowa*. IUNG Puławy-PIB, 92.
32. Borowiecki J., Gawel E., Guy P. 1997. Wzrost i plonowanie oraz jakość masy roślinnej krajowych i zagranicznych odmian lucerny. I. Tempo wzrostu i plonowanie. Pam. Puł., 111: 35–50.
33. Borowiecki J., Małysiak B., Lipski S., Maczuga A. 1996. Plonowanie odmian lucerny mieszańcowej w zależności od częstotliwości koszenia. Pam. Puł., 107: 53–60.
34. Borowiecki J., Małysiak B., Maczuga A. 1996. Plonowanie odmian koniczyny czerwonej w zależności od częstotliwości koszenia w dwuletnim użytkowaniu. Pam. Puł., 108: 49–58.
35. Braun R. 2006. *Energiebilanz von Biogasanlagen*. Nachwachsende Rohstoffe, 42: 33.
36. Broniarz J. 2002. *Motylkowate drobnonasienne*. Syntezy wyników doświadczeń odmianowych COBORU, 1193: 5–11.
37. Brzóska F. 2007. *Lucerna na paszę*. <<http://www.farmer.pl/srodki-produkcji/pasze-zywienie/artykuly/lucerna-na-pasze,8101,0.html>> (dostęp: 28.11.2012).
38. Budzyński W. i in. 2011. *Sprawozdanie merytoryczne projektu badawczego. Efektywne systemy produkcji biomasy na gruntach rolniczych i ich konwersja do paliw ciekłych i gazowych*. Olsztyn 2011.
39. Budzyński W. 2010. *Sprawność energetyczna produkcji rzepaku ozimego*. [W:] *Technologia produkcji surowca*. Red. W. Budzyński i in., III/2: 73–75.
40. Budzyński W., Jankowski K., Truszkowski W. 2005. *Rolnicza i ekonomiczna efektywność technologii produkcji nasion rzepaku ozimego w wybranych gospodarstwach wielkoobszarowych*. Rośliny oleiste – Oilseed Crops, XXVI, 2: 421–436.
41. Budzyński W., Szczukowski S., Tworowski J. 2009. *Wybrane problemy z zakresu produkcji roślinnej na cele energetyczne*. [W:] *Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich*. Red. A. Harasim. I Kongres Nauk Rolniczych. Nauka – Praktyce. IUNG-PIB Puławy: 77–89.
42. Bujak K., Frant M., Harasim A. 2010. *Efektywność energetyczna produkcji roślinnej w płodozmianie 4-polowym w zależności od uproszczeń w uprawie roli i poziomu nawożenia mineralnego*. Acta Agroph., 15(1): 23–31.
43. Burczyk H. 2012. *Przydatność jednorocznych roślin, uprawianych do produkcji biomasy na potrzeby energetyki zawodowej*. Problemy Inżynierii Rolniczej (I–III), 1 (75): 59–68.
44. Bury M. 2011. *Porównanie plonowania miskanta chińskiego i olbrzymiego uprawianych na Pojezierzu Miśliborskim*. [W:] *Agronomia w zrównoważonym rozwoju współczesnego rolnictwa*. IV Konfer. Nauk. PTA, 5–7 września 2001 r., SGGW, Warszawa: 74–76.
45. Bury M., Stankowski S., Hury G., Krzywy-Gawrońska E. 2011. *Wpływ nawożenia mineralnego azotem na wydajność fitomasy kukurydzy, sorga zwyczajnego i trawy sudańskiej w warunkach gleb lekkich*. [W:] *Agronomia w zrównoważonym rozwoju współczesnego rolnictwa*. IV Konfer. Nauk. PTA, 5–7 września 2001 r., SGGW, Warszawa: 76–77.
46. Buxton D.R., Anderson I.C., Hallam A. 1999. *Performance of sweet and forage sorghum grown continuously, double-cropped with winter rye, or in rotation with soybean and maize*. Agron. J., 91(1): 93–101.

47. Caslin B., Finnan J., McCracken A. 2010. *Miscanthus best practice guidelines*. Teagasc and the Agri-Food and Bioscience Institute.
48. Cherney, J.H., K.D. Johnson, J.J. Volenec, E.J. Kladvik, D.K. Greene. 1990. *Evaluation of potential herbaceous biomass crops on marginal crop lands. Agronomic potential, final report 1985-1989*. ORNL/Sub/85-27412/5 P1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, <<http://bioenergyornl.gov>> (dostępność: 22.11.2012).
49. Chmura K., Chylińska E., Dmowski Z., Nowak L. 2009. *Rola czynnika wodnego w kształtowaniu plonu wybranych roślin polowych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. PAN Kraków, 9: 33-44.
50. Ciepela G.A., Jankowska J., Jankowski K., Jodełka J. 2008. *Jakość plonu kępki pospolitej i jej mieszanek z roślinami motylkowatymi*. Pam. Puł., 147: 5-13.
51. Ciubiak J., Krzywy E., Krzywy-Gawrońska E., Styrzczała P. 2009. *Wpływ wieloskładnikowych nawozów mineralnych na plon i skład chemiczny miskanta cukrowego*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 538: 15-21.
52. Clifton-Brown J.C., Lewandowski I. 2002. *Screening Miscanthus genotypes in field trials to optimize biomass yield and quality in Southern Germany*, Europ. J. Agron., 16: 97-110.
53. Czyż H. 2009. *Pasza z krótkotrwałych użytków zielonych*. <[www.wrp.pl/Indhold/sider/showarticle-7/default.aspx?id=7306](http://www.wrp.pl/Indhold/sider/showarticle-7/default.aspx?id=7306)> (dostęp: 15.11.2012).
54. Ćwintal M. 1993. *Plonowanie i jakość lucerny mieszańcowej w zależności od nawożenia oraz liczby pokosów w roku*. Fragm. Agron., 3(39): 21-34.
55. Ćwintal M. 2008. *Struktura tanu i plonowanie di- i tetraploidalnej koniczyny czerwonej w roku pełnego użytkowania w zależności od ilości i sposobu wysiewu nasion*. Pam. Puł., 147: 15-29.
56. Ćwintal M. 2009. *Zakładamy plantację lucerny*. Nasza Rola, 5: 18-21.
57. Ćwintal M. 2010. *Polowa uprawa traw pastewnych*. Nasza Rola, 3: 23-26.
58. Ćwintal M., Sowa P. 2006. *Efekty przedsewnej stymulacji nasion lucerny światłem lasera w roku siewu i latach pełnego użytkowania*. Acta Sc. Polon., Agricult., 5(1): 11-23.
59. Ćwintal M., Wilczek M. 2004. *Plonowanie di- i tetraploidalnej koniczyny czerwonej na tle zróżnicowanego nawożenia mineralnego*. Annal. UMCS, E, 59(2): 607-612.
60. Ćwintal M., Wilczek M. 2008. *Agrotechnika lucerny*. Studia Regionalne i Lokalne Polski Południowo-Wschodniej. T. III. *Lucerna w żywieniu ludzi i zwierząt*. Lublin: 7-21.
61. Ćwintal M., Wilczek M. 2012. *Wpływ czynników agrotechnicznych na cechy plonotwórcze i jakość lucerny*. Studia Regionalne i Lokalne Polski Południowo-Wschodniej. T. VIII: *Lucerna w żywieniu ludzi i zwierząt*. Lublin: 10-27.
62. Daccord R., Arrigo Y., Vogel R. 1995. *Nährwert von Maissilage*. Agrar Forsch., 9: 397-400.
63. DEFRA – Departament for Environment, Food and Affairs. *Planting and growing Miscanthus*. <<http://adlib.eversite.co.uk/resources/000/023/838/miscanthus-guide.pdf>> (dostęp: 29.11.2012).
64. Dembek R. 2008. *W trosce o trwałe mieszanki*. <[www.farmer.pl/produkcja-roslinna/inne-uprawy/pastewne/w-trosce-o-trwale-mieszanki,11538.html](http://www.farmer.pl/produkcja-roslinna/inne-uprawy/pastewne/w-trosce-o-trwale-mieszanki,11538.html)> (dostęp: 10.11.2012).
65. Demidowicz G. 2005. *Bonitacja agroklimatu Polski dla wielokośnego zbioru zielonej masy lucerny*. Acta Agroph., 6(1): 53-58.
66. Deska J. 2009. *Wybrane problemy uprawy rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) na nasiona w warunkach klimatycznych Wysoczyzny Siedleckiej*. Rozprawa Naukowa Nr 105.
67. Deuter M., Jeżowski S. 1997. *Szanse i problemy hodowli traw z rodzaju Miscanthus jako roślin alternatywnych. I Seminarium Krajowe Rośliny alternatywne w Polsce*. IGR, PAN, Poznań: 61-65.
68. Dobek T. 2003. *Energetyczna i ekonomiczna ocena technologii produkcji rzepaku ozimego*. AR Szczecin, Rozpr., 219.
69. Domański P. 1997. *Osiągnięcia krajowej hodowli wieloletnich roślin pastewnych straconym czynnikiem intensyfikacji produkcji pasz*. Biul. Oceny Odm., 29: 47-52.
70. Domański P. 1999. *Poradnik dla użytkowników łąk i pastwisk*. Agencja Reklamowa „Prodruk”, Poznań.
71. Dubas A. 2003. *Kukurydza*. [W:] *Szczegółowa uprawa roślin*. Red. Z. Jasińska, A. Kotecki. Wyd. AR, Wrocław: 263-289.
72. Dubas A., Michalski T. 1991. *Wpływ rozdrobnienia roślin kukurydzy zbieranej w różnych fazach dojrzałości na cechy ilościowe i jakościowe kisonki Cz. I. Plony i jakość surowca*. PTPN, Prace Komisji Nauk Rolniczych i Komisji Nauk Leśnych, LXXI: 11-19.

73. Dubas A., Michalski T. 2002. *Kukurydza w Polsce po II wojnie światowej*. Pam. Puł., 130: 115–123.
74. Dubis B. 2012. *Rolnicza i energetyczno-ekonomiczna ocena produkcji ziarna pszenicy jarej na cele konsumpcyjne*. Rozpr. i Monogr., 171: 1–130.
75. Dudek S., Żarski J., Kuśmierk R. 2004. *Ocena potrzeb wodnych i efektów nawadniania kupkówki pospolitej*. Acta Agrof., 3(1): 43–48.
76. Dzienna S., Sosnowski A. 1991. *Możliwość stosowania siewu bezpośredniego na glebie kompleksu żyznego dobrego w warunkach klimatycznych Pomorza Zachodniego*. Roczn. Nauk Rol., Ser. A, 109(2): 157–173.
77. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej z 2013 r., poz. 39.
78. Dziezyć J. 1993. *Czynniki plonotwórcze plonowania roślin*. Warszawa.
79. Eder B., Eder J., Papst C., Darnhofer B., Mukengele M., Heuwinkel H., Oechner H. 2009. *Welcher maissortentyp zur Biogaserzeugung*. Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science. Vol. 1: 57–72.
80. Faber A., Kuś J., Matyka M. 2009. *Uprawa roślin na potrzeby energetyki*. Wyd. PKPP Lewiatan, Warszawa: 1–32.
81. Fiedler P., Mendaluk J., Rosler A. 1998. *Miscanthus sinensis – biomasa i oczyszczanie ścieków*. Hod. Rośl. Nas., 2: 49–53.
82. Fiedler Ż., Jaworska J. 2009. *Organizmy pożyteczne występujące na plantacjach roślin energetycznych*. Fragm. Agron., 26(4): 22–27.
83. Fischer T., Krieg A. 2001. *Biogazownie rolnicze – przegląd sytuacji na świecie*. [W:] *Odnawialne źródła energii na początku XXI wieku*. Międzynar. Kongres, 10–11 grudnia 2001, Warszawa.
84. Fordoński G., Gronowicz Z., Grochot G., Sereżyn Z. 1995. *Badania nad reakcją odmian lucerny na sposób siewu*. Acta Acad. Agric. Techn. Olst., Agricult., 60: 63–72.
85. Fotyma E. 1994. *Reakcja roślin uprawy polowej na nawożenie azotem. III. Kukurydza*. Fragm. Agron., 4: 20–35.
86. Fotyma E. 2003. *Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej*. Nawozy i Nawożenie, 4(17): 117–136.
87. Frey L. 2002. *Polska księga traw*. Wyd. Inst. Botan. im. W. Szafera PAN, Kraków.
88. Fritz M., Formowitz B. 2010. *Eignet sich Miscanthus als Biogassubstrat?* Zusammenge stellt für die Arbeitsgruppe I (Substratproduktion) im „Biogas Forum Bayern“.
89. Fugol M., Prask H. 2011. *Porównanie uzysku biogazu z trzech rodzajów kiszonek z kukurydzy, lucerny i trawy*. Inżyn. Roln., 9(134): 31–39.
90. Fugol M., Szlachta J. 2010. *Zasadność używania kiszonki z kukurydzy i gnojowicy świńskiej do produkcji biogazu*. Inżyn. Roln., 1(119): 169–174.
91. Gams W., Klamer M., O'Donnell K. 1999. *Fusarium miscanthi sp. Nov from Miscanthus litter*. Mycologia, 91(2): 263–268.
92. Gawel E. 2000. *Ocena przydatności mieszanek lucerny z trawami do użytkowania pastwiskowego. I. Plonowanie i skład botaniczny*. Pam. Puł., 121: 67–82.
93. Gawel E. 2007. *Mieszanki wypielęgnowane*. <[www.farmer.pl/drukuj/4156.html](http://www.farmer.pl/drukuj/4156.html)> (dostęp: 14.11.2012).
94. Gawel E. 2011. *Zakładanie lucernika*. Hod. i Chów Bydła, 3: 30–36.
95. Gawel E., Bawolski S. 1995. *Gęstość siewu komponentów mieszanek koniczyny czerwonej z trawami w zróżnicowanych warunkach siedliskowych. Cz. I. Mieszanki di- i tetraploidalnych odmian koniczyny czerwonej z kostrzewą łąkową*. Pam. Puł., 106: 63–79.
96. Gawel E., Brzóska F. 2008a. *Uprawa i wykorzystanie lucerny*. IUNG Puławy, 146.
97. Gawel E., Brzóska F. 2008b. *Uprawa mieszanek koniczyny czerwonej z trawami*. Instrukcja upowszechnieniowa, 148.
98. Gawel E., Brzóska F. 2009. *Uprawa mieszanek lucerny z trawami*. Instrukcja upowszechnieniowa, 154.
99. Głodek E., Kalinowski W., Janecka L., Werszler A., Garus T., Kościanowski J. 2007. *Pozyskanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego. Cz. I – proces technologiczny*. Opole: 2–32.
100. Głowacka A. 2007. *Wpływ współzrzednej uprawy pasowej na zachwaszczenie kukurydzy pastwnej*. Acta Agroph., 10/3: 573–582.
101. Gniazdowski J. 2009. *Ocena wydajności biogazu dla planowanej biogazowni przy fermie krów mlecznych*. Probl. Inżyn. Roln., 3: 67–73.

102. Goć E., Muzalewski A. 1997. *Wskaźniki eksploatacyjno-ekonomiczne maszyn i ciągników rolniczych stosowanych w gospodarstwach indywidualnych*. IBMER, Warszawa.
103. Goliński P., Jokš W. 2007. *Właściwości chemiczne i biologiczne traw a produkcja biogazu*. Łąk. Pol., 10: 37–47.
104. Gołaszewski J. 2010b. *Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce*. Post. Nauk Rol., 2: 69–94.
105. Gołębiewska B., Klepacki B. 2002. *Zastosowanie rachunku ekonomicznego w podejmowaniu decyzji w zakresie wyboru technologii produkcji zbóż*. [W:] *Produkcja i rynek zbóż*. Red. J. Rozbicki. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa: 305–316.
106. Gołębiewska H., Knaus A. 2009. *Efektywność chemicznej regulacji zachwaszczenia w różnych systemach uprawy kukurydzy*. Acta Sci. Pol., Agricultura 8(1): 3–16.
107. Goraj L., Mańko S. 2009. *Rachunkowość i analiza ekonomiczna w indywidualnym gospodarstwie rolnym*. Wyd. Difin.
108. Gorzelany J., Puchalski Cz., Malach M. 2011. *Ocena kosztów i nakładów energetycznych w produkcji kukurydzy na ziarno i kiszonkę*. Inż. Roln., 8(133): 135–141.
109. Gostomczyk W. 2010. *Ocena efektywności inwestycji biogazowych*. [W:] *Ekonoenergetyka – zagadnienia technologii, ochrony środowiska i ekonomiki*. Wyd. GWSA, Gdańsk: 55–80.
110. Gostomczyk W. 2011. *Miejsce Polski na europejskim rynku biomasy energetycznej*. Wieś Jutra, 158/159: 9–11.
111. Gotowska M., Jakubczak A. 2011. *Znaczenie odnawialnych źródeł energii dla zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich*. Wieś Jutra, 158/159: 1–2.
112. Gradziuk P. 2003a. *Biogaz*. [W:] *Biopaliwa*. Red. P. Gradziuk. Wyd. Wieś Jutra: 138–145.
113. Gradziuk P. 2003b. *Zasoby energetyczne biomasy i ich rozmieszczenie*. [W:] *Biopaliwa*. Red. P. Gradziuk. Wyd. Wieś Jutra: 22–59.
114. Gradziuk P., Grzybek A. 2003. *Charakterystyka odnawialnych źródeł energii*. [W:] *Biopaliwa*. Red. P. Gradziuk. Wyd. Wieś Jutra: 10–21.
115. Gradziuk P., Grzybek A., Kowalczyk K., Kościk B. 2003. *Biopaliwa*. Warszawa: 1–83.
116. Grala A., Dudek M., Zieliński M., Dębowski M. 2011. *Porównanie wydajności produkcji biogazu w procesie fermentacji metanowej wybranych roślin energetycznych*. Rocz. Ochr. Środow., 13: 1359–1372.
117. Grant R., Stock R. 1996. *Harvesting corn and sorghum for silage*. <<http://www.ianrpubs.unl.edu/range/g1231.html>> (dostęp: 19.11.2012).
118. Greef J.M., Deuter M., Schondelmaier J. 1997. *Genetic diversity of European Miscanthus species revealed by AFLP fingerprinting*. Genetic Res. Crop Evol. 44: 185–195.
119. Groblichhoff F., Lutke Entrup N., Berendonk C., Clemens J. 2007. *Biogaserzeugung mit kurzlebigen und ausdauernden Grasern*. Mitteilungen der AGGF, 8: 165–197.
120. Grzebisz W., Gaj R. 2007. *Zintegrowany system nawożenia kukurydzy*. [W:] *Integrowana produkcja kukurydzy*. Rred. Z. Kaniuczak i S. Pruszyński. Wyd. IOR, Poznań: 19–24.
121. GUS. 2012. *Produkcja upraw rolnych i ogrodnich w 2011 roku*. Materiały źródłowe.
122. Harasim A. 2006. *Przewodnik ekonomiczno-rolniczy w zarysie*. IUNG-PIB, Puławy.
123. Harasim A. 2008a. *Ocena ekonomiczna i energetyczna różnych systemów produkcji pasz objętościowych*. Pam. Puł., 47: 97–109.
124. Harasim J. 2008b. *Wpływ typu gleby na plony mieszanek koniczynowo-trawiaistych*. Pam. Puł., 147:111–124.
125. Harasim A., Noworolnik K. 1998. *Wpływ zróżnicowanego poziomu nawożenia mineralnego i ochrony roślin na efektywność produkcji jęczmienia jarego*. Pam. Puł., 112: 67–72.
126. Harasimowicz-Herman G. 1996. *Ocena oddziaływania nawożenia na plon roślin motylkowych i ich wartość następczą*. Wyd. ATR, Bydgoszcz. Rozprawy 72: 1–104.
127. Harkot W. 1999. *Wpływ czynników siedliskowych na wzrost i rozwój Dactylis glomerata L. w mieszkankach z Phleum pratense L. i Lolium perenne L.* Łąk. Pol., 2: 51–58.
128. Harley J. A. 2007. *Versatile solution? Growing Miscanthus for Bioenergy*. Renew. Energy World Magaz. 10, <<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2007/01/a-versatile-solution-growing-miscanthus-for-bioenergy-51557>> (dostęp: 01.01.2013).
129. Hasiak W., Budzianowski M. 2011. *Wpływ polityki energetycznej na tempo rozwoju elektrowni biogazowych w Niemczech w latach 2001–2010*. Computer-Aided Engineering and Design: 1–5.

130. Heiermann M., Plöchl M., Linke B., Schelle H. 2001. *Biogas production in agriculture by co-fermentation of energy crops*. In: *Proceedings of the conference „Biomass and energy crops II”*. Aspects of Applied Biology Series, 65: 65-70
131. Heiermann M., Plöchl M. 2002. *Pflanzliche Biomassen – ein großes Potenzial für die Biogasgewinnung*. Abteilung Technikbewertung und Stoffkreisläufe. Institut für Agrartechnik Bornim, Potsdam.
132. Himken M., Lammel J., Neukirchen D., Czypionka-Krause U., Olf H.W. 1997. *Cultivation of Miscanthus under West European conditions: Seasonal changes in dry matter production, nutrient uptake and remobilization*. Plant Soil, 189: 117–126.
133. Hołubowicz-Kliza G. 2006. *Korzyści z uprawy rutwicy wschodniej*. Instrukcja upowszechnieniowa nr 127.
134. Hołubowicz-Kliza G. 2007. *Uprawa sorga cukrowego w technologii „mix-cropping”*. Instrukcja upowszechnieniowa nr 135. IUNG-PIB Puławy: 3–12.
135. Hoy J.W, Zheng Jiaxie, Grelen L.B., Geaghan J.P. 1993. *Longevity of teliospores of Ustilago scitaminea in soil*. Plant Dis., 77 (4): 393-397.
136. Hryniewicz M., Grzybek A. 2010. *Energochłonność skumulowana uprawy miskantusa*. Problemy Inżynierii Rolniczej, 2: 123–129.
137. Hryniewicz Z. 1993. *Uprawa roślin rolniczych*. PWRiL: 92–110.
138. Hurej M., Twardowski J. 2009. *Fitofagi występujące na miskancie olbrzymim (Miscanthus x giganteus L.)*. Prog. Plant Prot., 49 (3): 1183–1186.
139. Ignaczak S. 1996. *Wartość zielonki z rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) jako surowca dla różnych form paszy*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 468: 145–157.
140. Ignaczak S. 1997. *Porównanie tradycyjnego i ekstensywnego systemu użytkowania rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.)*. Biul. Oceny Odmian, 29: 143–148.
141. Ignaczak S. 1999a. *Fodder galega (Galega orientalis Lam.) used in long-term fallow land preservation as a potential fodder source*. Materiały Sesji Naukowej. Zesz. Nauk. AR Kraków, 347: 123–129.
142. Ignaczak S. 1999b. *Wartość zielonki z rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) jako surowca dla różnych form paszy*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 468: 145–157.
143. Ignaczak S. 2010. *Produkcyjność plantacji nasiennych rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) użytkowanych ekstensywnie*. J. Res. Appl. Agric. Engng., 55(3): 122–127.
144. Ignaczak S., Wojciechowska W. 1992. *Rutwica wschodnia (Galega orientalis Lam.) nowa motylkowata roślina pastewna*. Post. Nauk Roln., 4: 21–32.
145. Indira S., Xiude X., Iamsupasit N., Shetty H.S., Vasanthi N.S., Singh S.D., Bandyopadhyay R. 2002. *Diseases of sorghum and pearl millet in Asia*. [In:] Ed. J.F. Leslie. *Sorghum and Millets Diseases*. Iowa State University Press, Ames, IA: 393–402.
146. Iżewska A. 2009. *Przydatność kompostów z komunalnego osadu ściekowego do nawożenia miskanta cukrowego (Miscanthus sacchariflorus (MAXIM.) HACK)*. Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny, Szczecin: 1–108.
147. Jadczyzyn T., Kowalczyk J., Lipiński W. 2010. *Zalecenia nawozowe dla roślin uprawy polowej i trwałych użytków zielonych*. Materiały szkoleniowe, 95.
148. Jäger F. 2008. *Sorghum, a source of renewable energy in Northern Europe? – conclusions of research and practical experience*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Wyd. UP, Poznań: 231-234.
149. Jäger F. 2012. *Aktuelle Erfahrungen mit dem Anbau neuer Sorghumhybriden als Energieund Futterpflanze in Deutschland*. [W:] *Kukurydza i sorgo – produkcja, wykorzystanie, rynek*. Poznań.
150. Jankowska J., Ciepiela G.A., Kolczarek R., Jankowski K. 2008. *Wpływ rodzaju nawozu mineralnego i dawki azotu na plonowanie i wartość pokarmową runi tłąki trwałej*. Pam. Puł., 147: 125–138.
151. Jankowski K. 2007. *Siedliskowe i agrotechniczno-ekonomiczne uwarunkowania produkcji nasion rzepaku ozimego na cele spożywcze i energetyczne*. Wyd. UWM, Olsztyn, Rozpr. i Monogr., 131: 1–174.
152. Jankowski K., Budzyński W. 2000. *Wpływ sposobu wiosennego nawożenia azotem na plonowanie i energochłonność produkcji rzepaku ozimego. II. Energochłonność produkcji nasion*. Rośliny Oleiste XXI: 439–447.



153. Jasiulewicz M. 2010. *Potencja produkcji biogazu w Polsce*. [W:] *Ekoenergetyka – zagadnienia technologii, ochrony środowiska i ekonomiki*. Wyd. GWSA, Gdańsk: 81–102.
154. Jasiulewicz M. 2011. *Perspektywy rozwoju aeroenergetyki w polskim rolnictwie do 2020 r.* *Więś Jutra*, 158/159: 12–15.
155. Jelinowska A., Magnuszewska K. 1994. *Porównanie sposobu siewu mieszanek lucerny z niektórymi gatunkami traw*. cz. I. *Plonowanie i skład botaniczny*. *Pam. Puł.*, 104: 61–73.
156. Jelinowska A., Skrzyński H. 1994. *Lucerna. Zalecenia agrotechniczne*. *Technologie uprawy roślin*. IUNG Puławy, 20.
157. Jeżowski S. 2001. *Rośliny energetyczne – ogólna charakterystyka, uwarunkowania fizjologiczne i znaczenie w produkcji biopaliwa*. *Post. Nauk Rol.*, 2: 18–27.
158. Jeżowski S. 2003. *Rośliny energetyczne – produktywność oraz aspekt ekonomiczny, środowiskowy i socjalny ich wykorzystania jako ekobiopaliwa*. *Post. Nauk Rol.*, 3: 61–73.
159. Jeżowski S., Głowacka K., Bocianowski J. 2007. *Zmienność wybranych klonów traw olbrzymich z rodzaju Miscanthus pod względem plonowania w pierwszych latach uprawy*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 517: 339–348.
160. Jodelka J., Jankowski K., Mateńko M., Ciepela G.A. 2006. *Przydatność koniczyny łąkowej i lucerny mieszańcowej do uprawy z kupkówką pospolitą na glebach typu arenosole*. *Łąk. Pol.*, 9: 79–86.
161. Juszkiewicz M., Kaliszewicz D., Kucka E. 1994. *Energochłonność uprawy kukurydzy oraz różnych sposobów jej konserwacji*. *Acta Acad. Agricult. Tech. Olst., Oeconomica*, 30: 79–86.
162. Kaack K., Schwarz K.-U. 2001. *Morphological and mechanical properties of Miscanthus in relation to harvesting, lodging and growth conditions*. *Industrial Crop and Products*, 14: 145–154.
163. Kacprzak A., Michalska K., Romanowska-Duda Z., Grzesik M. 2012. *Rośliny energetyczne jako cenny surowiec do produkcji biogazu*. *Kosmos – Probl. Nauk Biol.*, 61(2): 281–293.
164. Kaczmarek S., Matysiak K., Krawczyk R. 2008. *Badania nad możliwościami chemicznego odchwaszczania sorga w warunkach Wielkopolski*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Poznań: 233–234.
165. Kaczmarek S., Matysiak K., Krawczyk R. 2009. *Badania nad chemicznym odchwaszczaniem sorga zwyczajnego (Sorghum vulgare PERZ.)*. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 8(1): 27–35.
166. Kaczor A., Zuzanska J. 2010. *Efektywność nawożenia siarką kupkówki pospolitej w warunkach zróżnicowanego zaopatrzenia roślin w azot*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 556: 135–142.
167. Kaiser F.L. 2007. *Einfluss der stofflichen Zusammensetzung auf die Verdaulichkeit nachwachsender Rohstoffe beim anaeroben Abbau in Biogasreaktoren*. Technische Universität München. Doktors der Agrarwissenschaften genehmigten Dissertation: 1–176.
168. Kalam P. 2011. *The required characteristics of ensiled crops used as a feedstock for biogas production: a review*. *J. Agrobiol.*, 28(2): 85–96.
169. Kalembsa S., Symanowicz B. 2003. *Wpływ infekcji nasion rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) na plon suchej masy i wartość energetyczną*. *Acta Sci. Pol., Agric.*, 2(2): 157–162.
170. Kalembsa S., Symanowicz B. 2008. *Zmiany zawartości molibdenu i kobaltu w biomacie rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.)*. [W:] *Pierwiastki śladowe w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne, pierwiastki śladowe w łańcuchu żywnościowym*. Sympozjum naukowe Koszalin-Mielno, 11–14 maja 2008: 164–165.
171. Kalina J., Skorek J., Cebula J., Latocha L. 2003. *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu z biogazowni rolniczych*. *Gospod. Paliw. Energ.*, 12: 15–19.
172. Kaltschmitt M., Hartmann H. 2001. *Energie aus Biomasse*. Springer-Verlag Berlin: 1–770.
173. Karsznicka A.M., Grzesik M., Mika B. 2005. *Uprawa traw na biomase – możliwości i ograniczenia*. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 504: 631–637.
174. *Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010–2020*. <<http://www.pigeo.org.pl/pliki/tresci-pl/137/Kierunki%20Rozwoju%20Biogazowni%20Rolniczych%20w%20Polsce%20na%20lata%202010-2020.pdf>> (dostęp: 30.10.2012).
175. Klepacki B. 2005. *Ekonomiczne aspekty produkcji rzepaku*. [W:] Red. C. Muśnicki, I. Bartkowiak-Broda, M. Mrówczyński. *Technologia produkcji rzepaku*. Wyd. *Więś Jutra*, Warszawa: 164–172.
176. Klicka I., Fordoński G., Grochot G., Seredyn Z. 1995. *Wpływ sposobu siewu, częstotliwości i wysokości koszenia na wzrost i plon lucerny mieszańcowej*. *Acta Acad. Agric. Techn. Olst., Agricult.*, 60: 43–53.

177. Klikocka H. 2006. *Efektywność energetyczna różnych sposobów uprawy roli i nawożenia naturalnego w produkcji ziemniaka*. Acta Agrophysica, 8(2): 385–393.
178. Klimiuk W., Pokój T., Budzyński W., Dubis B. 2010. *Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents*. Biosource Technology 101: 9527–9535.
179. Kochanowska R., Gamrat R. 2007. *Uprawa miskanta cukrowego (Miscanthus sacchariflorus (Maxim.) Hack.) – zagrożeniem dla polskich lasów i pól? Łąkarstwo w Polsce*, 10: 223–228.
180. Kołodziej B. 2012. *Sorgo dwukolorowe Sorghum bicolor (L.) Moench*. [W:] Red. B. Kołodziej, M. Matyka. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań: 359–366.
181. Korycińska A. 2009. *Stan i rozwój sektora bioenergii*. [W:] *Odnawialne źródła energii nowym wyzwaniem dla obszarów wiejskich w Polsce*. Wyd. FAPA. Opole: 7–9.
182. Kościak B., Kowalczyk-Juśko A., Kościak K. 2003. *Uprawa miskanta cukrowego i spartiny preriowej*. [W:] Red. W. Ciechanowicz, S. Szczukowski. *Ogniwa paliwowe i biomasa lignocelulozowa szansą rozwoju wsi i miast*. Wyd. WSISiZ, Warszawa: 51–54.
183. Kotecki A. 2010. *Uprawa miskanta olbrzymiego. Energetyczne i pozaenergetyczne możliwości wykorzystania stomy*. Wyd. UP, Wrocław: 1–186.
184. Kowalczyk-Juśko A. 2010. *Redukcja emisji zanieczyszczeń dzięki zastąpieniu węgla biomasa spartiny preriowej*. Problemy Inżynierii Rolniczej 4: 69–77.
185. Kowalczyk-Juśko A., Kościak B. 2004. *Produkcja biomasy miskanta cukrowego i spartiny preriowej w zróżnicowanych warunkach glebowych oraz możliwości jej konwersji na energię*. Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 234: 213–218.
186. Kowalik I., Michalski T. 2006. *Wpływ niektórych czynników agrotechnicznych na parametry jakościowe kisonki z kukurydzy odmiany „stay-green”*. Pam. Puł., 142: 201–213
187. Kozłowski S., Goliński P. 2000. *Trawy*. [W:] Red. K.W. Duczmal, H. Tucholska. *Nasiennictwo*. PWRiL, Poznań: 125–173.
188. Kozłowski S., Swędryński A. 1997. *Żywotność odmian hodowlanych kupkówki pospolitej (Dactylis glomerata L.)*. Biul. Oceny Odm., 28: 103–112.
189. Kozłowski S., Swędryński A., Zielewicz W. 2011. *Rośliny motylkowate w środowisku przyrodniczym*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, 4(36): 161–181.
190. Krasowicz S., Nowacki W. 2005. *Wpływ intensywności technologii na efektywność produkcji roślinnej*. Pam. Puł., 140: 87–102.
191. Krawiec F. 2010. *Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego. Wybrane problemy*. Wyd. DIFIN, Warszawa: 11–12.
192. Kruczek A., Szulc P. 2005. *Tempo gromadzenia suchej masy przez kukurydzę w zależności od dawki fosforu, rodzaju nawozu i sposobu nawożenia*. Acta Agroph., 6(3): 689–700.
193. Kruczek A., Książek J. 2004. *Potrzeby pokarmowe kukurydzy i zasady nawożenia*. [W:] Red. A. Dubas, *Technologie produkcji kukurydzy*. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa: 40–51.
194. Kruczek A., Sulewska H. 2005. *Wpływ sposobu nawożenia, terminu siewu i odmian na gromadzenie składników mineralnych przez kukurydzę w początkowym okresie rozwoju*. Acta Agroph., 5/3: 683–694.
195. Kryszak A., Grynia M., Kryszak J., Grzelak M. 2003. *Plonowanie wiechliny łąkowej i tymotki łąkowej nawożonych makro- i mikroelementami*. Biul. IHAR, 225: 91–97.
196. Książek J., Bojarszczuk J., Staniak M. 2012. *Produkcyjność kukurydzy i sorga w zależności od poziomu nawożenia azotem*. Polish J. Agron., 8: 20–28.
197. Książek J., Machul M., Brzóska F., Rola H., Kęsik K., Górski T., Siódmiak J., Hołubowicz-Kliza G., Madej A. 2009. *Uprawa kukurydzy pastewnej na ziarno i CCM*. Instrukcja upowszechnieniowa, 153: 1–87.
198. Książek J., Bojarszczuk J., Staniak M. 2012. *Ocena plonowania sorga uprawianego systemem ekologicznym w zależności od sposobu pielęgnacji i dawki nawożenia organicznego*. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 57(4): 6–9.
199. Kujawski O. 2009. *Przegląd technologii produkcji biogazu cz. I*. Czysza Energia, 12: 23–25.
200. Kulczycki G. 2000. *Wpływ zróżnicowanego nawożenia potasem na wybrane właściwości gleby oraz plon i pobranie składników pokarmowych przez kukurydzę*. Roczn. Gleboznawcze, 1/2: 29–37.
201. Kuś J. 2012. *Biopaliwa gazowe*. [W:] Red. B. Kołodziej, M. Matyka. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań: 205–210.

202. Kuś J., Faber A. 2009. *Produkcja roślinna na cele energetyczne a racjonalne wykorzystanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski*, I Kongres Nauk Rol., IUNG-PIB, Puławy.
203. Kuś J., Matyka M. 2009. *Wydajność wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne w zależności od jakości gleby*. *Fragm. Agron.*, 26(4): 103–110.
204. Kuś J., Matyka M. 2010. *Uprawa roślin na cele energetyczne*. Instrukcja upowszechnieniowa, 176: 1–64.
205. Lewandowski I. 2005. *Miskantus – biomasa przyszłości*. *Czysta Energia*, 12: 18–19.
206. Lewandowski W.M. 2002. *Biomasa*. [W:] *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*. Wyd. Nauk.-Techn. II, Warszawa: 234–251.
207. Lewandowski W.M. 2003. *Biogaz*. [W:] *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*. Wyd. Nauk.-Techn. II, Warszawa: 252–268.
208. Lewandowski W.M. 2010. *Biomasa*. [W:] *Proekologiczne źródła energii odnawialnej*. Wyd. Nauk.-Techn., Warszawa: 234–251.
209. Lisowski J., Parwisiak H. 2010. *Wpływ nawożenia osadami na plon miskanta (Miscanthus giganteus)*. *Fragm. Agron.*, 27(4): 94–101.
210. *Lista Odmian Roślin Rolniczych. 2012*. COBORU, Słupia Wielka. <[http://www.coboru.pl/polska/Rejestr/ListyOdmian/lista\\_rolnicze\\_2012.pdf](http://www.coboru.pl/polska/Rejestr/ListyOdmian/lista_rolnicze_2012.pdf)> (dostęp: 25.11.2012).
211. *Lista Opisowa Odmian*. 2009, 2010, 2012. Centralny Ośrodek Badań Roślin Uprawnych. Słupia Wielka.
212. Łepecki A. 2012. <<http://agropellet.nazwa.pl/energia/index.php?option=com-content&view=article&id=110&Itemid=106>> (dostęp: 15.11.2012).
213. Machul M. 1995. *Wpływu przedsięwzięcia przygotowania roli na plonowanie kukurydzy uprawianej w pięcioletniej monokulturze*. *Pam. Puł.*, 106: 47–62.
214. Machul M. 2005. *Wybrane elementy agrotechniki kukurydzy*. *Agro-Serwis* 3, 1: 37–41.
215. Machul M. 2007. *Możliwości i skutki stosowania uproszczeń i siewu bezpośredniego w uprawie kukurydzy*. *Studia i Raporty IUNG-PIB: Wybrane elementy technologii produkcji roślinnej*, 9: 159–170.
216. Machul M. 2012. <[http://www.dowagro.com/PublishedLiterature/dh\\_003b/0901b8038003b\\_b28.pdf](http://www.dowagro.com/PublishedLiterature/dh_003b/0901b8038003b_b28.pdf)> (dostęp: 22.11.2012).
217. Mahmood A. 2012. *Performance of sorghum (Sorghum bicolor L. Moench) as an energy crop for biogas production*. Faculty of Agricultural and Nutritional Sciences. Justus Liebig University Giessen, Germany: 1–120.
218. Maj R., Woźniak M., Ziolo Z. 2010. *Zarys koncepcji organizacji produkcji PX w strukturze regionalnego kompleksu energetyczno-agro-przemysłowego*. [W:] *Lucerna w żywieniu ludzi i zwierząt*. 4<sup>th</sup> International Conference „Feed and Food Additives” Lublin – Sandomierz, 7–8 czerwca 2012: 94–102.
219. Majtkowski W. 1998. *Przydatność wybranych gatunków traw typu C<sub>4</sub> do upraw alternatywnych*. *Hod. Rośl. Nas.* 2: 41–44.
220. Majtkowski W. 2007. *Sorgo i szczaw*. *Agroenergetyka*, 2:18–19.
221. Majtkowski W. 2012. *Proso różgowate Panicum virgatum L.* [W:] Red. B. Kołodziej, M. Matyka. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań: 302–308.
222. Majtkowski W., Majtkowska G., Piłat J., Mikołajczak J. 2004. *Przydatność do zakiszania zielonki traw C-4 w różnych fazach wegetacji*. *Biul. IHAR*, 234: 219–225.
223. Margel L. 2004. *Prognozowanie procesu fermentacji metanowej mieszaniny osadów ściekowych i gnojowicy*. Wyd. PB Białystok. *Rozp. Nauk.*, 112: 1–136.
224. Matthot M., Mertens J., Verlinden G., Lambert R. 2008. *Positive effects of sulphur fertilization on grasslands yields and quality in Belgium*. *Europ. J. Agron.*, 28: 655–658.
225. Matyjewski A., Mos M. 2012. *Miskant olbrzymi – roślina z wielkim potencjałem*. *Cz. I. Cz. II*. *Czysta Energia*, 7–8: 27–29; 9: 32–34.
226. Matyka M., Kuś J. 2012. *Ślaziovec pensylwański Sida hermaphrodita L. (Rusby)*. [W:] Red. B. Kołodziej, M. Matyka. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań: 267–271.

227. Michalski T. 1989. *Wpływ wysokości cięcia na plony i wartość pastewną kukurydzy zbieranej na kiszonkę*. Roczn. Nauk Rol. Seria A, 108(2): 177–189.
228. Michalski T. 2004. *Kierunki uprawy i wykorzystania kukurydzy w świecie i w Polsce*. [W:] Red. A. Dubasa. *Technologie produkcji kukurydzy*. Wyd. Wieś Jutra, Warszawa: 7–15.
229. Michalski T. (Red.) 2008. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. UP Poznań.
230. Michalski T. 2012a. *Kukurydza – rośliną przyszłości. Materiały konferencyjne: „Kukurydza i sorgo – produkcja, wykorzystanie, rynek”*. Poznań: 7–11.
231. Michalski T. 2012b. *Produkcja wybranych rolniczych surowców energetycznych. Kukurydza zwyczajna Zea mays L.* [W:] Red. B. Kołodziej, M. Matyka. *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*. Powszechno-Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań: 318–337.
232. Michalski T., Kowalik I. 2008. *Planowanie bazy surowcowej na potrzeby gminnej biogazowni w warunkach Wielkopolski*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Wyd. UP, Poznań: 203–209.
233. Mikołajczak J., Wróbel B., Jurkowski A. 2009. *Możliwości i bariery w produkcji biogazu z biomasy trwałych użytków zielonych w Polsce*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, 9(2): 139–155.
234. Mirowski T. 2007. *Koncepcja rachunku kosztów docelowych produkcji biomasy na cele energetyczne*. Polityka Energetyczna, 10 (2): 343–353.
235. Mistele M. 1991. *Quantifi zierung von Verlusten bei Silomais*. Mais, 4: 16–19.
236. Moraczewski R. 1996. *Łąki i pastwiska w gospodarstwie rolnym*. Fundacja Rozwój SGGW.
237. Mossimann E. 1993. *Place des legumineuses dans les melanges fourragers en Suisse*. Fourrages, 134: 159–164.
238. Mukengele M., Brule M., Oechsner H. 2006. *Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag*. Landtechnik 1: 26–27.
239. Murphy J., Braun R., Weiland P., Wellinger A. 2011. *Biogas from crop digestion*. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas: 1–24.
240. Muzalewski A. 2003. *Koszty eksploatacji maszyn*. IBMER, Warszawa, 18: 1–39.
241. Myczko A. 2011. *Cele polityki wykorzystania biomasy rolniczej do konwersji w prąd i ciepło*. [W:] Red. A. Myczko. *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych*. Wyd. ITP, Falenty: 7–9.
242. Myczko R., Kołodziejczyk T. 2011a. *Proces fermentacji beztlenowej*. [W:] Red. A. Myczko. *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych*. Wyd. ITP, Falenty: 10–15.
243. Myczko R., Kołodziejczyk T. 2011b. *Kategorie i zasady doboru substratów do instalacji*. [W:] Red. A. Myczko. *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych*. Wyd. ITP, Falenty: 16–23.
244. Mystkowski E. 2012. *Wykorzystanie roślin uprawnych w celach energetycznych*. Kukurydza, 1: 23–29.
245. Nabi C.G., Riaz M., Ahmad. G. 2006. *Comparison of some advanced lines of Sorghum bicolor (L.) Moench for green/dry matter yields and morpho-economic parameters*. J. Agric. Res., 44: 191–196.
246. Niemczewska J. 2010. *Ocena opłacalności wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej z biogazu na przykładzie biogazowni rolniczej*. Nafta – Gaz, LXVI, 8: 691–694.
247. Nieróbca P., Grabiński J., Szeleźniak E. 2008. *Wpływ intensywności technologii uprawy zbóż w płodozmianie zbożowym na efektywność produkcyjną i ekonomiczną*. Acta Sci. Polon., Agricultura, 7(3): 73–80.
248. Nijak K. 2012. *Najważniejsze szkodniki i choroby roślin wieloletnich uprawianych na cele energetyczne*. [W:] *Popularyzacja prac badawczo-rozwojowych z zakresu odnawialnych źródeł energii*. Seminarium naukowe, Poznań.
249. Nowak W., Sowiński J. 2007. *Wpływ podziału dawki azotu i doboru komponentów traw do mieszanek z koniczyną czerwoną na plonowanie i skład chemiczny. Część I. Plonowanie*. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln., 516: 121–127.

250. Noworolnik K. 2007. *Podstawy optymalizacji technologii produkcji zbóż*. Post. Nauk Rol., 1: 23–30.
251. O'Neill N.R., Farr D.F. 1996. *Miscanthus blight, a new foliar disease of ornamental Grasses and sugarcane incited by Leptosphaeria sp. and its anamorphic state Stagonospora sp.* Plant Dis., 80 (9): 980-987.
252. Olszewska M. 2006. *Wpływ nawożenia azotem na przebieg procesów fizjologicznych, indeks zieloności liści oraz plonowanie kupkówki pospolitej i życicy trwałej*. Łąk. Pol., 9: 151–160.
253. Oniszcz-Popławska A., Mroczkowski P. 2010. *Stan i kierunki rozwoju sektora biogazowni rolniczych w Polsce*. Czysta Energia, 7/8: 16–18.
254. Pado K., Beres P.K. 2012. *Jak zabezpieczyć łan kukurydzy przed chorobami?* Kukurydza 1(40): 52–54.
255. Pańka D., Jeske M., Szczepanek M. 2012. *Badania nad podatnością tymotki łąkowej (Phleum pratense L.) na porażenie przez patogeny grzybowe*. Post. Ochr. Rośl., 52(2): 381–384.
256. Paradowki A., Kierzek R. 2009. *Ekonomiczne aspekty chemicznego odchwaszczania kukurydzy po wycofaniu antrazy*. Progress in Plant Protection, 49 (4): 1630–1637.
257. Patel K.I., Ahlawat R.P.S., Trivedi S.J. 1993. *Effect of nitrogen and phosphorus on nitrogen uptake and protein percentage of forage sorghum*. Gujarat Agric. Univ. Res. J. 18: 87–88.
258. Pawlak J. 1989. *Organizacyjne i ekonomiczne aspekty mechanizacji produkcji roślinnej w indywidualnych gospodarstwach rolniczych*. PWRiL, Warszawa.
259. Pazura R. 2009. *Wstęp*. [W:] *Odnawialne źródła energii nowym wyzwaniem dla obszarów wiejskich w Polsce*. Wyd. FAPA, Opole: 5–6.
260. Peng Y., Niu J., Peng Z., Zhang F., Li Ch. 2010. *Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil*. Field Crops Res., 115: 85–93.
261. Pietrzak K., Grela E. R. 2012. *Lucerna i jej produkty w żywieniu zwierząt*. Studia Regionalne i Lokalne Polski Południowo-Wschodniej. T. VIII. *Lucerna w żywieniu ludzi i zwierząt*. Lublin: 37–60.
262. Piskier T. 2009. *Analiza efektywności energetycznej uprawy topinamburu z przeznaczeniem na opat – wstępne wyniki badań*. Inżyn. Rol., 5: 237–243.
263. Płaskowska E. 2010. *Charakterystyka i taksonomia grzybów z rodzaju Fusarium*. Mikol. Lek., 17 (3): 172–176.
264. Płatek W. 2007. *Biomasa w energetyce rozproszonej*. Czysta Energia, 1:28–29.
265. Podkówa W. 1977. *Możliwości ograniczenia strat przy zakiszaniu pasz w pryzmach naziemnych*. Międzynarodowe Czasopismo Rolnicze, 4: 76–80.
266. Podkówa W. 2012. *Biogaz z biomasy*. Nasza Rola, 7: 46–47. <<http://www.naszarola.pl/arch>> (dostęp: 5.12.2012).
267. Podkówa Z., Podkówa W. 2008a. *Energia elektryczna i ciepła z kukurydzy*. [W:] Red. T. Michalski *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Wyd. UP, Poznań: 210–223.
268. Podkówa Z., Podkówa W. 2010. *Substraty dla biogazowni rolniczych*. Wyd. „Agro Serwis”, Warszawa: 1–73.
269. Podleśna A. 2005. *Nawożenie siarką jako czynnik kształtujący metabolizm roślin uprawnych i jakość płodów rolnych*. Pam. Puł., 139: 161–174.
270. Podleśny J. 1995. *Chińska trawa trzcinowata rośliną XXI wieku?* Rolnik, 11: 5.
271. Podleśny J. 2005. *Trawa Miscanthus x giganteus – jej charakterystyka oraz możliwości wykorzystania*. Post. Nauk Rol., 2: 41–52.
272. Polska Norma PN-ISO9831:2002P
273. Praczyk T. 2007. *Zalecenia w zakresie ochrony kukurydzy przed chwastami na 2007 rok*. Wieś Jutra, 3: 17–18.
274. Pude R. 2012. <[http://www.inaro.de/Deutsch/Kulturpf/Miscant/Misc\\_anbau.htm](http://www.inaro.de/Deutsch/Kulturpf/Miscant/Misc_anbau.htm)> (dostęp: 30.12.2012).
275. Pude R., Franken H. 1999. *Miscanthus – Erfolgreiche Verarbeitung*. Energie Pflanzen, 3/4: 30–34.
276. Pyś J.B., Borawiec F., Karpowicz A. 2008. *Jakość fermentacji, skład chemiczny i stabilność tlenowa kiszonek z sorgo cukrowego sporządzanych z dodatkiem różnych preparatów kiszonych*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Wyd. UP, Poznań: 239–241.

277. Radecki A., Opic J. 1991. *Metoda siewu bezpośredniego w świetle literatury krajowej i zagranicznej*. Roczn. Nauk Rol., Ser. A, 109(2): 119–141.
278. Radkowski A., Grygierzec B. 2006. *Porównanie plonowania i zawartości białka u wybranych odmian lucerny mieszańcowej (Medicago media Pers.) i lucerny siewnej (Medicago sativa L.)*. Acta Agr. Silv., XLVIII: 41–48.
279. Radkowski A., Kasperczyk M., Kuboń M. 2005. *Uprawa traw na nasiona w aspekcie jakości materiału siewnego i wielkości ponoszonych nakładów*. Inż. Roln., 7: 237–243.
280. Raig H., Metlitskaja J., Meripóld H., Nömmsalu H. 2001. *The history of adaptation and introduction of fodder galega*. Fodder galega: 7–12.
281. Raig H., Nömmsalu H. 2001. *Biological characterisation of fodder galega*. Fodder galega: 13–19.
282. Raport z badań biogazodochodowości. 2010. Biogaz Zeneris Sp. z o.o. PPNT. Poznań.
283. Raport z badań: określenie plonu i wydajności jednostkowej biogazu i biometanu oraz wszystkich parametrów fizycznych i chemicznych warunkujących wartość energetyczną załączonych prób roślin rolniczych przeznaczonych na użytkowanie energetyczne. Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska Wydziału Ochrony Środowiska i Rybactwa UWM, Olsztyn 2012.
284. Rembeza J., Seremak-Bulge J. 2007. *Interakcja cen zbóż na rynku polskim z rynkami zagranicznymi*. Zagadn. Ekon. Rol., 4: 111–121.
285. Remlein-Starosta D. 2007. *Choroby roślin energetycznych*. Prog. Plant Prot., 47 (4): 351–357.
286. Rhoads F.M., Wright D.L. 1998. *Root mass as a determinant of corn hybrid response to starter fertilizer*. Journal of Plant Nutrition, 21(8): 1743–1751.
287. Rimovsky K. 1987. *Resztki poźniwne roślin uprawnych i ich wpływ na bilans masy organicznej w glebie*. Acta Acad. Agric. Techn. Olst., Agricult., 44: 163–170.
288. Rola J., Rola H. 1995. *Wpływ uproszczonej technologii uprawy kukurydzy i buraków cukrowych na stan zachwaszczenia wtórnego plantacji na Dolnym Śląsku*. Mat. 35. Sesji Nauk. Inst. Ochr. Roślin, cz. I: 139–145.
289. Rola J., Sekutowski T., Rola H., Badowski M. 2009. *Problem chwastów na nowo zakładanych plantacjach Miscanthus giganteus*. Pam. Puł., 150: 233–246.
290. Romaniuk W., Karbowy A. 2008. *Uwarunkowania rozwoju biogazowni rolniczych*. Probl. Inżyn. Roln., 3: 105–112.
291. Roszewski R. 1996. *Miskant olbrzymi – Miscanthus sinensis giganteus*. [W:] *Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe i jako odnawialne źródło energii*. Wyd. SGGW, Warszawa: 123–135.
292. Roszkowski A. 2003. *Biomasa roślinna jako szansa dywersyfikacji produkcji roślinnej*. Pam. Puł., 132: 371–379.
293. Roszkowski A. 2008. *Biomasa kontra rolnictwo*. Inżyn. Roln., 10(108): 201–208.
294. Rozporządzenie Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskiwania i przedstawiania świadectw pochodzenia. (Dz. U. nr 156 z 14.08.2008 r.).
295. Sałek T., Budzyński W., Truszkowski W. 2011. *Wydajność biomasy i biogazodochodowość surowca z celowych upraw energetycznych*. [W:] Red. A. Cienian, J. Gołaszewski, T. Noch. *Ekoenergetyka – biogaz i syngaz. Technologie, strategie rozwoju, prawo i ekonomika w regionie Morza Bałtyckiego*. Gdańsk: 176–184.
296. Sawicki B., Kościk K. 2003. *Trawy i zbiorowiska trawiaste*. [W:] Red. K. Kościk. *Rośliny energetyczne*. Wyd. AR, Lublin: 111–135.
297. Scally L., Hodgkinson T., Jones M.B. 2001. *Origins and Taxonomy of Miscanthus*. [In:] Eds. M.B. Jones, M. Walsh. *Miscanthus for energy and fibre*. London: 1–10.
298. Schattauer A., Weiland P. 2006a. *Grundlagen der anaeroben Fermentation*. [W:] *Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung*. Gülzow: 25–35.
299. Schattauer A., Weiland P. 2006b. *Beschreibung ausgewählter Substrate*. [W:] *Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung*. Gülzow: 86–96.
300. Sekutowski T. 2008. *Effect of different tillage system on maize yield and degradation dynamics of rimsulfuron in soil*. Acta Sci. Pol., Agricultura 8(2): 9–20.
301. Sekutowski T., Rola J., Rola H. 2010. *Możliwość ochrony plantacji miskanta olbrzymiego (Miscanthus giganteus) przed chwastami jednoliściennymi*. Prog. Plant Prot., 50 (3): 1395–1399.

302. Sienkiewicz S., Wojnowska T., Pilejczyk D. 1999. *Plonowanie rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.) oraz zawartość związków organicznych w zależności od zróżnicowania nawożenia fosforowo-potasowego*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 468: 223–232.
303. Skarżyńska A. 2009. *Produkcja, koszty i nadwyżka bezpośrednia wybranych produktów rolniczych w 2008 roku*. Wyd. IERiGŻ-PIB.
304. Skarżyńska A., Augustyńska-Grzymek I., Ziętek I., Cholewa M., Maciszewski P. 2006. *Produkcja, koszty i dochody wybranych producentów rolnych w latach 2002–2005*. Wyd. IERiGŻ-PIB, Warszawa.
305. Skrajna T., Skrzyczyńska J., Affek-Starczewska A. 2008. *Zachwaszczenie sorga (Sorghum ssp.) uprawianego na paszę w środkowej części Wysoczyzny Siedleckiej*. *Fragm. Agron.*, 3(99): 172–177.
306. Skrzyniarz H. 1992. *Technologia uprawy lucerny. Zalecenia agrotechniczne*. [W:] *Technologie uprawy roślin*. T. II. IUNG Puławy: 127–143.
307. Skrzypczak W. 2003. *Możliwości zwalczania chwastów w uprawie kukurydzy pastewnej*. *Kukurydza*, 1(21): 25–27.
308. Skrzypczak W., Szulc P., Waligóra H. 2008. *Skuteczność chwastobójcza herbicydów stosowanych w uprawie sorga*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystanie kukurydzy i sorga*. Poznań: 248–249.
309. Snopczyński T., Gołębiowska H. 2008. *Ocena skuteczności działania mieszanin herbicydowych w kukurydzy*. *Fragm. Agrom.*, 2: 138–145.
310. Sosnowski J., Jankowski K. 2010. *Wpływ użyźniacza glebowego a skład florystyczny i plonowanie mieszanek Festulolium braunii z koniczyną tåkową i lucerną mieszańcową*. *Łåk. Pol.*, 13: 157–166.
311. Sowiński J., Liszka-Podkowa A. 2008. *Wysokość i jakość plonu kukurydzy i sorga cukrowego na glebie lekkiej w zależności od dawki azotu*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorga*. Wyd. UP, Poznań: 250–252.
312. Staniak M. 2009. *Plonowanie i wartość paszowa mieszanek Festulolium braunii (Richt.) A. Camus z di- i tetraploidalnymi odmianami koniczyny tåkowej*. *Fragm. Agron.*, 26(2): 105–115.
313. Staniak M., Brzóška F. 2009. *Trawy pastewne w uprawie polowej. Instrukcja upowszechnieniowa*. IUNG Puławy-PIB, 162.
314. Steppa M. 1988. *Biogazownie rolnicze*. IBMER, Warszawa.
315. Stewart R.J., Toma Y., Fernandez F.G., Nishiwaki A., Yamada T. i Bollero G.A. 2009. *The ecology and agronomy of Miscanthus sinensis, a species important to bioenergy crop development in its native range in Japan: a review*. *GCB Bioenergy*, 1: 126–153.
316. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. 2008. *Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych*. *Energetyka i Ekologia*, 1: 77–80.
317. Strauß Ch., Vetter A., Nehring A. 2009. *Entwicklung und Vergleich Standortangepasster Produktionssysteme für Energiepflanzen*. Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science, Erding: 47–56.
318. Sulewska H. 2004. *Wymagania środowiskowe kukurydzy i możliwości jej uprawy w Polsce*. [W:] Red. A. Dubas (red.). *Technologia produkcji kukurydzy*. Wyd. Wieś Jutra: 16–23.
319. Sulewska H. 2007. *Wymagania środowiskowe kukurydzy*. [W:] Red. Z. Kaniuczak, S. Pruszyński. *Integrowana produkcja kukurydzy*, Wyd. IOR, Poznań: 6–9.
320. Symanowicz B., Kalembsa S. 2010. *Wpływ nawożenia fosforowo-potasowego na plon i zawartość makroelementów w biomacie rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.)*. *Fragm. Agron.*, 27(1): 177–185.
321. Symanowicz B., Pala J., Kalembsa S. 2005. *Wpływ procesu biologicznej redukcji N<sub>2</sub> na pobranie azotu przez rutwicę wschodnią (Galega orientalis Lam.)*. *Acta Sci. Pol., Agric.*, 4(2): 93–99.
322. Szczepanek M. 2009. *Wpływ ilości wysiewu i rozstawy rzędów na plonowanie Phleum pratense uprawianej na nasiona*. *Łåk. Pol.*, 12: 189–197.
323. Szczepanik D. 2005. *Produkcja i wykorzystanie biogazu w rolnictwie*. *Czysta Energia*, 10: 36–37.
324. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M. 2004. *Wierzba energetyczna*. Plantpress Kraków.
325. Szczukowski S., Kościk B., Kowalczyk-Juško A., Tworkowski J. 2006. *Uprawa i wykorzystanie roślin alternatywnych na cele energetyczne*. *Fragm. Agron.*, 3: 300–315.
326. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Kwiatkowski J., Krzyżaniak M., Lajszner W., Graban Ł. 2012. *Wieloletnie rośliny energetyczne*. MULTICO, Warszawa.

327. Szempliński W. 2003. *Siedliskowe i agrotechniczne uwarunkowania produkcji ziarna jęczmienia jarego na paszę w północno-wschodniej Polsce*. UWM Olsztyn, Rozp. I Monogr., 71: 99.
328. Szempliński W., Bogucka B., Wróbel E. 2009. *Przydatność mieszańców kukurydzy o zróżnicowanej wczesności do uprawy na kiszonkę w warunkach województwa warmińsko-mazurskiego*. Acta Sci. Pol., Agricult., 8(1): 57–68.
329. Szempliński W., Dubis B. 2011. *Wstępne badania nad plonowaniem i wydajnością energetyczną wybranych roślin uprawianych na cele biogazowe*. Fragm. Agron., 28(1): 77–86.
330. Szempliński W., Dubis B. 2012. *Rośliny zbożowe*. [W:] Red. W. Szempliński. *Rośliny rolnicze*. Wyd. UWM, Olsztyn: 9–124.
331. Szempliński W., Winnicki T. 2012. *Rośliny energetyczne*. [W:] Red. W. Szempliński. *Rośliny rolnicze*. Wyd. UWM, Olsztyn: 458–462.
332. Szlachta J. 2008. *Możliwości produkcji biogazu z produktów pochodzenia rolniczego*. Referat na Międzynarodowej Konferencji w IBMER, Warszawa: 223–229.
333. Szlachta J. 2009. *Możliwości pozyskiwania biogazu rolniczego jako odnawialnego źródła energii*. Ekspertyza. Wyd. AgEngPol: 1–34.
334. Szlachta J., Fugol M. 2009. *Analiza możliwości produkcji biogazu na bazie gnojowicy oraz kiszonki z kukurydzy*. Inżyn. Roln., 5(114): 275–280.
335. Szmigiel A., Oleksy A., Kołodziejczyk M. 2006. *Porównanie opłacalności produkcji ziarna różnych grup użytkowych pszenicy ozimej w zależności od poziomu agrotechniki*. Pam. Puł., 142: 525–535.
336. Szpunar-Krok E. 2011. *Produkcyjne i ekonomiczne efekty wybranych technologii produkcji nasion roślin strączkowych w siewie czystym i ich mieszkankach ze zbożami*. Rozpr. habil., Wyd. Uniw. Rzesz.: 169.
337. Szumiło G., Rachoń L. 2008. *Wpływ terminu siewu i rozstawy rzędów na plonowanie sorga (Sorghum bicolor L. MOENCH)*. [W:] Red. T. Michalski. *Problemy agrotechniki oraz wykorzystanie kukurydzy i sorgo*. Poznań: 253–259.
338. Szwejkowska B., Szempliński W. 2012. *Rośliny bobowe (motylkowe)*. [W:] Red. W. Szempliński. *Rośliny rolnicze*. Wyd. UWM, Olsztyn: 206–305.
339. Szymańska M., Łabętowicz J. 2009. *Dostępność i zasoby substratów do produkcji biogazu w Polsce*. Czysta Energia, 5(93): 48.
340. Szymański K. 2010. *Nowe rozwiązania w zakresie pozyskiwania biogazu według technologii MT-ENERGIE®*. Rocz. Ochr. Środow., 12: 249–262.
341. Ścibor H. 1999. *Plonowanie dwu- i trójgatunkowych mieszanek koniczyny czerwonej z trawami w warunkach ograniczonego nawożenia azotem*. Pam. Puł., 117: 83–98.
342. Ścibor H., Magnuszewska K. 1998. *Wpływ intensywności użytkowania koniczyny czerwonej i jej mieszanek z kostrzewą łąkową na plonowanie*. Rocz. AR Poznań, CCCVII: 41–45.
343. Śliwiński B.J., Brzóska F. 2006. *Historia uprawy sorgo i wartość pokarmowa tej rośliny w uprawie na kiszonkę*. Post. Nauk Rol., 1:25–37.
344. Tekiel A. 2009. *Zwalczanie chorób kukurydzy*. Agro Serwis, 5: 54–56.
345. Tworkowski J., Szczukowski S., Jakubiuk P. 1999. *Skaryfikacja a wartość siewna nasion rutwicy wschodniej (Galega orientalis Lam.)*. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 468: 233–240.
346. Undersander D.J., Smith L.H., Kaminski A.R., Kelling K.A., Doll J.D. 2000. *Sorghum-Forage*. <<http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/forage.html>> (dostkp: 14.11.2012).
347. Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (nowelizacja: Dz.U. z 2012 r., poz. 1059).
348. Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dz.U. nr 169, poz. 1199).
349. Vance W., Bell R., Seng V. 2004. *Rainfall analysis for the Provinces of Battambang*. Kampong Cham and Takeo. The Kingdom of Cambodia. School of Environmental Science. Murdoch University, Australia.
350. Warzecha R. 2011. *Kukurydza genetycznie zmodyfikowana w świecie, Europie i Polsce. Kukurydza – nowe perspektywy*. Wyd. „Agro serwis”, Warszawa.
351. Wasilewski Z., Barszczewski J. 2011. *Stan trwałych użytków zielonych i możliwości ich wykorzystania do produkcji biogazu*. Probl. Inżyn. Roln., 2: 149–156.



352. Weiland, P. 2000. *Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und-erzeugung in Deutschland*. Gulzoer Fachgespräche. Vol. 15: *Energetische Nutzung von Biogas: „Stand der Technik und Optimierungspotenzial“*. Weimar: 8–27.
353. Weizsäcker E.V., Lovins A.B., Lovins H.L. 1999. *Mnożnik cztery. Podwójny dobrobyt – dwukrotnie mniejsze zużycie zasobów naturalnych. Raport dla Klubu Rzymskiego*. Wyd. Rolewski, Toruń.
354. Węgrzyn A., Zajac G. 2008. *Wybrane aspekty badań efektywności energetycznej technologii produkcji biomasy roślinnej*. Acta Agroph., 11(3): 799–806.
355. Wielicki W. 1989. *Analiza efektywności energetycznej w rolnictwie*. Post. Nauk Rol., 1: 69–86.
356. Wielogórska G., Turska E., Czarnocki Sz. 2008. *Ocena technologii stosowanych w gospodarstwach uprawiających kukurydzę na kisonkę w rejonie środkowowschodniej Polski*. Pam. Puł., 147: 203–213.
357. Wiese J., Kujawski O. 2006. *Biogaz zyskuje na znaczeniu*. Czysta Energia, 10: 39–40.
358. Wiesenthal T. Ed. 2006. *How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?* EEA Report, 7: 1–67.
359. Wilczek M. 2003. *Rośliny motylkowe drobnonasienne*. [W:] Red. Z. Jasińska, A. Kotecki. *Szczegółowa uprawa roślin*. Wyd. AR, Wrocław: 141–214.
360. Wilczek M. 2008. *Wpływ terminów i ilości wysiewu na plonowanie di- i tetraploidalnej koniczyny czerwonej w roku pełnego użytkowania*. Pam. Puł., 147: 215–225.
361. Wilczek M., Cwintal M. 1993. *Plonowanie lucerny mieszańcowej (Medicago media Pers.) w zależności od terminu i ilości wysiewu. Cz. II. Plonowanie*. Biul. IHAR, 185: 71–78.
362. Wilczek M., Cwintal M. 1994. *Plonowanie lucerny w zależności od rośliny ochronnej i różnych pielęgnacji w roku siewu*. Annal. UMCS, E, XLIX, 5: 31–36.
363. Wilczek M., Cwintal M., Andruszczyszyn K., Wilczek P. 1999. *Plonowanie i jakość tetraploidalnej koniczyny łąkowej (czerwonej) w zależności od niektórych czynników agrotechnicznych. Cz. II. Plonowanie*. Biul. IHAR: 210: 3–30.
364. Wilczek M., Fordoński G. 2007. *Wpływ stymulacji nasion światłem lasera na intensywność fotosyntezy i transpiracji oraz plonowanie koniczyny czerwonej*. Acta Agroph., 9(2): 517–524.
365. Wójcicki Z. 2000. *Wyposażenie techniczne i nakłady materiałowo-energetyczne w rozwojowych gospodarstwach rolniczych*. IBMER, Warszawa.
366. Wójcicki Z., 2005. *Metodyczne problemy badania energochłonności produkcji rolniczej*. Probl. Inż. Rol., 1: 5–12.
367. Wójcicki Z. 2006. *Poszanowanie energii i środowiska w rolnictwie i na obszarach wiejskich*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 2/1: 33–48.
368. Zajac T. 2003a. *Rutwica wschodnia*. [W:] Red. Z. Jasińska, A. Kotecki. *Szczegółowa uprawa roślin*. Wyd. AR, Wrocław: 239–242.
369. Zajac T. 2003b. *Trawy w uprawie polowej*. [W:] Red. Z. Jasińska, A. Kotecki. *Szczegółowa uprawa roślin*. Wyd. AR, Wrocław: 245–289.
370. Zajac T., Stokłosa A., Klimek A., Thier M. 2007. *Cechy morfologiczne i rolnicze właściwości lucern (Medicago sp.), determinujące plonowanie i skład chemiczny*. Post. Nauk Roln., 329: 35–56.
371. *Założenia programu rozwoju biogazowni rolniczych*. 2009. MRiRW <[www.minrol.gov.pl/pol/Informacje-branzowe/Informacje-branzowe-aktualnosci/Zalozenia-programu-rozwoju-biogazowni-rolniczych](http://www.minrol.gov.pl/pol/Informacje-branzowe/Informacje-branzowe-aktualnosci/Zalozenia-programu-rozwoju-biogazowni-rolniczych)> (dostęp: 30.10.2012).
372. Zarebski P. 2011. *Rola odnawialnych źródeł energii w budowaniu spójności i konkurencyjności obszarów wiejskich*. Wieś Jutra, 158/159: 3–5.
373. Zielewicz W., Kozłowski S. 2008. *Ograniczenie nawożenia a skład chemiczny sorga cukrowego*. Łąkarstwo w Polsce, 11: 223–235.
374. Zołotiariew W.N., Kosolapow W.M., Liebidiewa N.N., Szewcow A. 2011. *Biocenotyczne i technologiczne podstawy selekcji wysoko wydajnych fitocenozy nasiennych rutwicy wschodniej o wieloletnim użytkowaniu*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, 3(35): 283–292.
375. <[http://raportrolny.com/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=75:trawy-pastewne-na-gruntach-ornych-%E2%80%93-agrotechnika-i-wykorzystanie-w-%C5%BCywienu-byd%C5%82a&Itemid=471](http://raportrolny.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=75:trawy-pastewne-na-gruntach-ornych-%E2%80%93-agrotechnika-i-wykorzystanie-w-%C5%BCywienu-byd%C5%82a&Itemid=471)> (dostęp: 11.12.2012).
376. <<http://wr.utp.edu.pl/uprawa/Ignaczak.html>> (dostęp: 5.12.2012).

377. <[http://www.biomax.com.pl/miskant\\_olbrzymi.php#gora](http://www.biomax.com.pl/miskant_olbrzymi.php#gora)> (dostęp: 29.11.2012).
378. <<http://www.caussade-nasiona.pl>> (dostęp: 17.11.2012).
379. <<http://www.euralis.pl>> (dostęp: 22.11.2012).
380. <[http://www.fao.org/nr/water/cropinfo\\_maize.html](http://www.fao.org/nr/water/cropinfo_maize.html)> (dostęp: 22.11.2012).
381. <<http://www.khbc.pl/index.php?site=64&L=1>>
382. <<http://www.kpodr.pl/index.php/produkcja-rolinna/42-inne/261-rutwica-wschodnia-atrakcyjna-rolina-paszowa>> (dostęp: 5.12.2012).
383. <<http://www.kpodr.pl/index.php/produkcja-zwierzca/45-inne/419-produkcja-kiszzonek-i-sianokiszzonek>> (dostęp: 5.12.2012).
384. <<http://www.kws.pl>> (dostęp: 22.11.2012).
385. <<http://www.lgseeds.pl>> (dostęp: 22.11.2012).
386. <<http://www.miskantolbrzymi.pl/index.php?sub=budowa>> (dostęp: 29.11.2012).
387. <<http://www.naszarola.pl/archnr/7/nasza%20rola%207.pdf>> (dostęp: 5.12.2012).
388. <[http://www.naturalengland.org.uk/Images/miscanthus-guide\\_tcm6-4263.pdf](http://www.naturalengland.org.uk/Images/miscanthus-guide_tcm6-4263.pdf)> (dostęp: 29.11.2012).
389. <<http://www.nk.com>> (dostęp: 22.11.2012).
390. <<http://www.pda.org.uk/leaflets/17/leaflet17-1.html>> (dostęp: 26.11.2012).
391. <<http://www.syngenta.com>> (dostęp: 30.10.2012).
392. <[www.agronews.com.pl/print.php?id=0&aid=10153](http://www.agronews.com.pl/print.php?id=0&aid=10153)> (dostęp: 10.11.2012).
393. <[www.rolnas.com.pl/produkty-ver.php?idg=2&idm=27&id=176](http://www.rolnas.com.pl/produkty-ver.php?idg=2&idm=27&id=176)> (dostęp: 22.11.2012)

# PRODUKCYJNOŚĆ WIERZBY KRZEWIASTEJ I ŚLĄZOWCA PENSYLWAŃSKIEGO ORAZ PRZYDATNOŚĆ ICH BIOMASY DO KONWERSJI W TERMOGENERATORZE

Autorzy:

Józef Tworkowski

Stefan Szczukowski

Mariusz Stolarski

Michał Krzyżaniak

Łukasz Graban

## 1. Wprowadzenie i przegląd literatury

Przyszłościowymi wieloletnimi roślinami energetycznymi w warunkach glebowo-klimatycznych Polski są wierzba (*Salix* L.) i ślázowiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* Rusby). Biomasa tych roślin energetycznych wykorzystywana jest aktualnie głównie do produkcji paliwa stałego (zrębki, brykiet, pelet) i służy do wytwarzania ciepła i energii elektrycznej z zastosowaniem technologii takich jak: spalanie i gazyfikacja, a w perspektywie w wyniku procesów termochemicznych lub biochemicznych do produkcji paliw drugiej i trzeciej generacji.

Opłacalność wytwarzania energii z biomasy zależy m.in. od rodzaju biomasy, kosztów jej wytwarzania oraz jej parametrów termochemicznych.

Cena energii uzyskiwanej z biomasy roślin energetycznych pozyskiwanych na gruntach rolniczych jest mało konkurencyjna wobec cen energii z węgla kamiennego. Aby uprawa roślin energetycznych była ekonomicznie uzasadniona, należy obniżyć koszty jej produkcji przez zmniejszenie nakładów i zwiększenie plonów (dostęp producentów do nowych odmian i technologii produkcji). Ponadto należy uwzględnić korzyści środowiskowe i możliwości rozwoju obszarów wiejskich wynikające z uprawy i wykorzystania tych roślin.

Wobec ciągle jeszcze słabego rozpoznania produkcji wierzby krzewiastej oraz ślázowca pensylwańskiego, a w szczególności sposobu zakładania plantacji, istnieje potrzeba prowadzenia dalszych badań w tym kierunku i opracowania technologii produkcji z uwzględnieniem oceny wartości energetycznej surowca i analizy ekonomicznej.

Rodzaj wierzba obejmuje ponad 450 gatunków wierzb [1], które rosną w klimacie umiarkowanym i chłodnym na północnej półkuli, a kilka z nich również na półkuli południowej. W Polsce ten rodzaj jest reprezentowany przez 28 gatunków i liczne mieszańce, trudne często do określenia [2]. Wierzby, podobnie jak topole, należą do roślin szybko rosnących. Są one roślinami światłolubnymi, zwykle rosną na glebach wilgotnych, chociaż niektóre gatunki występują na glebach suchych i piaszczystych. Większość gatunków to krzewy różnej wysokości, tylko wierzba biała i wierzba krucha z gatunków krajowych wyrastają w duże drzewa.

W wyniku dotychczas prowadzonych prac hodowlanych uzyskano odmiany wierzby przydatne głównie do uprawy w siedliskach gleb wyższych klas bonitacji rolniczej do zbioru w krótkiej (3–4-letniej) rotacji (SRWC – *short-rotation woody crops*). Odmiany te charakteryzuje: wysoki potencjał produkcyjny biomasy pozyskiwany w krótkich okresach czasu; łatwość rozmnażania wegetatywnego; zdolność do ponownego odrostu pędów po wielokrotnych zbiorach [3]. Jednakże pod połowe, wieloletnie plantacje energetyczne wierzby mogą być przeznaczane głównie gleby gorszej jakości, ponieważ gleby bardzo dobre i dobre powinny być przeznaczane do produkcji żywności, która pozostaje priorytetem.

W Katedrze Hodowli Roślin i Nasiennictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie już od początku lat osiemdziesiątych XX wieku prowadzono prace hodowlane, które pozwoliły na otrzymanie w 2003 roku pierwszych w Polsce odmian wierzby przydatnych do systemu uprawy (SRWC): Start, Sprint, Turbo, a w 2009 roku dalszych: Tur, Oltur i Kortur. Kolejnym efektem hodowli jest klon wierzby UWM 006, który uprawiany na stanowiskach gleb o średnim wskaźniku bonitacji rolniczej wyróżnia się wyższą produktywnością w porównaniu do aktualnie uprawianych odmian. Wprowadzanie nowych odmian wierzby i doskonalenie sposobu ich uprawy ma na celu zwiększenie plonów biomasy, co będzie kluczowym czynnikiem w zmniejszaniu kosztów jej produkcji.

Aktualnie w Polsce uprawy wierzby na gruntach rolniczych zajmują niewiele ponad 10 tys. ha. Przygotowanie gleby pod sadzenie zrzesów wierzby obejmuje typowe zabiegi rolnicze. Na plantacjach matecznych służących do reprodukcji materiału rozmnożeniowego oraz na małych plantacjach w celu corocznego pozyskiwania biomasy do celów energetycznych wysadza się przede wszystkim około 40 tys. roślin na hektar. Na większych plantacjach zaleca się obsadę od 10 do 20 tys. roślin na hektar, sadzonych pasowo, oraz zbiór w dłuższych 3- lub 4-letnich rotacjach. Wysadza się wcześniej przygotowane, 20–25 cm odcinki pędów, tzw. zrzesy. Wybór gęstości sadzenia wierzby zależy od gatunku i odmiany wierzby, jakości gleby, długości rotacji zbioru, warunków agrotechnicznych i klimatycznych oraz żądanych wymiarów końcowego

produktu (zrębków). Zbiór pędów wierzby prowadzi się po opadnięciu liści, czyli w okresie późnojesiennym i zimowym. Po ścięciu pędów wiosną z pąków śpiących na karpach wyrastają nowe łodygi. Eksploatacja plantacji wierzby może trwać nawet ponad 20 lat. Ponieważ pędy wierzby w odróżnieniu od np. ślazuca pensylwańskiego nie zasychają przed zimą, charakteryzują się wysoką, około 50% wilgotnością. Utrudnia to przechowywanie w postaci zrębków oraz ogranicza możliwości bezpośredniego ich spalania [4].

Plony wierzby w doświadczeniach ścisłych, prowadzonych w optymalnych warunkach osiągały wielkość nawet do 30 ton, a przeciętne plony wynosiły 10–15 ton suchej masy z hektara. Plony na plantacjach produkcyjnych są jednak zwykle niższe i wynoszą 5 do 10 ton suchej masy rocznie [5]. Przyczynami uzyskiwania przez rolników generalnie niskich plonów są trudności z właściwym wyborem i przygotowaniem pola, niewłaściwe nawożenie, błędy przy zakładaniu plantacji, przypadkowy dobór sadzonek, nieskuteczna kontrola nad chwastami, chorobami i szkodnikami.

W odniesieniu do oceny produktywności wierzby należy uwzględnić fakt, że prace hodowlane oraz badania technologii produkcji w aspekcie jej energetycznego wykorzystania rozpoczęły się niedawno. Dlatego w przyszłości z nadzieją należy oczekiwać postępu hodowlanego i technologicznego oraz znaczącego wzrostu plonów biomasy wierzby.

Ślazuca pensylwańska (*Sida hermaphrodita* Rusby), nazywany malwą pensylwańską, należy do rodziny ślazuwatych (*Malvaceae*). Pochodzi z południowych rejonów Ameryki Północnej. Do Polski introdukowano go w połowie XX wieku ze względu na możliwość wykorzystania go jako rośliny włóknistej, paszowej, miododajnej, a także leczniczej i przydatnej w przemyśle celulozowo-papierniczym. W ostatnich latach propagowana jest uprawa z przeznaczeniem jego biomasy na cele energetyczne [6].

Ślazuca pensylwańska jest rośliną wieloletnią, polikarpiczną o corocznie zasychających pędach. Suche pędy zbiera się zimą lub wiosną z przeznaczeniem do spalania w postaci rozdrobnionych zrębków lub przetworzonych do postaci peletów i brykietów. Ze względu na możliwość odrostu roślin po skoszeniu można uzyskać wysoki plon zielonej masy łodyg i liści z drugiego pokosu z przeznaczeniem jako substrat roślinny do biogazowni. Ponieważ liście ślazuca charakteryzują się dużą zmiennością pod względem wielkości i kształtu, istnieje możliwość wyselekcjonowania na drodze hodowlanej form z dużym udziałem liści, preferowanych do biogazowni oraz łodygowych, bardziej przydatnych do spalania.

Owoce ślazuca są rozłupnie, w których znajduje się 5–8 drobnych nasion. Masa 1000 nasion wynosi 2–4 g. Nasiona nie osypują się, lecz pozostają długo na zaschniętych łodygach. Plon nasion możliwy do uzyskania waha się w szerokich granicach od 15 do 400 kg · ha<sup>-1</sup> [7]. Nasiona po zbiorze bardzo

słabo kiełkują. Słabe kiełkowanie z powodu dużego udziału tzw. nasion twardej powłoki spowodowane jest występowaniem u nich nieprzepuszczalnej okrywy nasiennej dla wody i gazów. Jest to cecha charakterystyczna dla innych gatunków z rodziny *Malvaceae*, a także świadczy o braku uszlachetnienia tego gatunku w procesie hodowlanym. Problemy z kiełkowaniem nasion sprawiają trudności z generatywnym rozmnażaniem ślazuca i zakładaniem plantacji. Jednakże badania Borkowskiej i Styka [8], Grzesika [9] oraz własne doświadczenia wskazują na możliwość znacznej poprawy zdolności kiełkowania nasion ślazuca za pomocą procesu skaryfikacji, w szczególności chemicznej z użyciem stężonego kwasu siarkowego lub przez ich kondycjonowanie.

Roślina ta preferuje stanowiska ciepłe, ale toleruje też niskie i wysokie temperatury. Ślazuca jest rośliną o niezbyt dużych wymaganiach glebowych. Można go uprawiać na różnych typach gleb, łącznie z glebami piaszczystymi, pod warunkiem dobrego ich uwilgotnienia. Na stanowiskach żyzniejszych wytwarza jednak zdecydowanie większą masę niż na ubogich, ale różnice w plonach mogą być niwelowane odpowiednim zagęszczeniem roślin na plantacji [10]. Rośliny mające dwuletnią lub starszą karpę mają dobrze rozwinięty system korzeniowy, który pozwala przetrwać im okresy suszy. Źle znosi on gleby silnie uwilgotnione, zaskorupiające się i bardzo kwaśne. Pole pod uprawę ślazuca należy przygotować szczególnie starannie, zwłaszcza pod kątem jego odchwaszczenia. Jest to ważne ze względu na powolny początkowy wzrost roślin i możliwość zagłuszenia ich przez chwasty. Poza standardowymi zabiegami uprawowymi można po żniwach zastosować herbicydy na bazie glifosatu niszczące zielone chwasty a po kilku tygodniach wykonać podorywkę oraz bronowanie. Wiosną w celu wyrównania pola zastosować można agregat oraz wał gładki przed siewem. Gleby kwaśne należy zwapnować. W przypadku lokalizacji plantacji ślazuca na słabych glebach można przed siewem zastosować nawożenie mineralne w dawkach startowych. Natomiast w celu pozyskania wysokiego plonu biomasy ślazuca od drugiego roku wegetacji zaleca się bezwzględnie stosować pełne nawożenie. Ślazuca wykorzystuje wysokie dawki azotu. Według Borkowskiej i Styka [6] optymalne dawki azotu wynoszą do  $250 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Inni [11] wskazują na  $100 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Zamiast nawozów mineralnych można stosować w odpowiadającej dawce azotu gnojowicę lub pozostałości pofermentacyjne z biogazowni. Do nawożenia roślin ślazuca można również stosować popiół ze spalania biopaliw stałych. Nawożenie fosforem i potasem powinno być ustalane na podstawie analizy gleby. Zalecenia wskazują na szeroki zakres dawek  $30\text{--}120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  oraz od 50 do  $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$ .

Plantacje ślazuca można zakładać z wysiewu nasion oraz z organów wegetatywnych: sadzonek korzeniowych, sadzonek zielnych czy też sadzonek pochodzących z mikrorozmnażania w warunkach *in vitro*. Bezpośredni siew

nasion w polu jest preferowaną metodą zakładania plantacji, ponieważ jest ona najmniej pracochłonna. Jednak z powodu problemów z kiełkowaniem nasion ślazu oraz znacznych rozbieżności między zdolnością kiełkowania a wschodami w polu trudno uzyskać planowaną obsadę roślin. Zagęszczenie roślin w polu ma decydujący wpływ na wzrost oraz jakość i wysokość uzyskanego plonu. Obsada roślin ślazu uprawianego na dobrych glebach z przeznaczeniem na suche łądygi powinna wynosić 20–40 tys. roślin na 1 ha. Na stanowiskach gorszych oraz w uprawie na zieloną masę (na biogaz) zalecana obsada powinna być zwiększona nawet do 60 tys. roślin na 1 ha. Do uzyskania takiej obsady wystarczy wysiew około 1,5–2 kg uszlachetnionych nasion, gdy wysiewa się je w dobrych warunkach pogodowych i z uwzględnieniem właściwych zabiegów agrotechnicznych. W gorszych warunkach, na glebach słabszych należy zwiększyć wysiew nasion nawet do 5–6 kg · ha<sup>-1</sup>. Nie zawsze zapewni to zakładaną obsadę roślin, ale ogranicza ryzyko pustych placów na plantacji. Borkowska i Wardzińska [12] oraz Szyszak i in. [13] twierdzą, że większa ilość wysiewu nasion ślazu pozwala na uzyskanie wyższego plonu i lepszą jego jakość.

Z nasion ślazu wysianych w szklarni w odpowiednio przygotowane podłoże, najwygodniej w multiplaty, można uzyskać rozsadę, którą następnie wysadza się w polu. Takie zakładanie plantacji jest bardzo pracochłonne, ale pozwala na uzyskanie pożądanego zagęszczenia roślin. Wysadzona rozsada w korzystnych warunkach meteorologicznych szybko rośnie, tworzy zwarty łan i zmniejsza ryzyko silnego zachwaszczenia plantacji. Możliwe jest również zakładanie plantacji z 8–10 cm fragmentów korzeni ślazu. Korzenie powinno się wykopywać bezpośrednio przed ich wysadzeniem, aby ochronić je przed przesuszeniem. Sadzenie powinno być wykonane wczesną wiosną przed ruszeniem wegetacji roślin. Prawidłowo wysadzone sadzonki wykazują szybkie tempo wzrostu, tworzą masywne pędy i silny system korzeniowy.

Rozstawa rzędów przy wysadzaniu sadzonek powinna być szeroka (60–75 cm), aby zapewnić możliwość pielęgnacji międzyrzędowej. Aktualnie brak jest zaleceń do chemicznej walki z chwastami na plantacjach ślazu.

W pierwszym roku wegetacji roślina ślazu wytwarza pojedyncze pędy o wysokości 80–120 cm. Zaschnięte pędy należy zebrać późną jesienią lub zimą. Plony biomasy ślazu z pierwszego zbioru są niskie. W następnych latach rośliny wyrastają w zależności od warunków uprawy na wysokość 300–400 cm. Plony suchej masy pędów są bardzo zróżnicowane i wahają się od kilku do kilkunastu ton z 1 ha. Potencjalne plony mogą wynosić nawet 30 ton s.m. z 1 ha [14]. Zbiór roślin ślazu można prowadzić od późnej jesieni do wiosny przy wilgotności biomasy 20–30%.

Ciepło spalania biomasy ślazu wynosi około 18,5 MJ · kg<sup>-1</sup> s.m. Większą wartość ciepła spalania uzyskuje się zdaniem Szyszak-Bargłowicz i Piekarskiego

[15] z łodyg cieńszych (10–13 mm) niż grubszych. Zaletą ślazuwca jest niska zawartość w biomase popiołu i składników mineralnych (N, K, Cl).

Ważnym elementem, decydującym o wyborze rodzaju uprawy rośliny energetycznej przez producenta, są nakłady kosztów i energii na założenie i prowadzenie plantacji. Koszty założenia i prowadzenia plantacji ślazuwca są bardzo zróżnicowane i zależne od wyboru sposobu zakładania plantacji. Najwyższe koszty związane są z zakładaniem plantacji ślazuwca z wysadzanych ręcznie sadzonek. Ostateczna opłacalność produkcji biomasy ślazuwca uzależniona jest od możliwości jej sprzedaży, kosztów transportu i jej przetwarzania.

## **2. Cel badań**

Celem pracy było określenie wpływu wybranych czynników agrotechnicznych na plonowanie i jakość biomasy wierzby krzewiastej oraz ślazuwca pensylwańskiego i na tej podstawie dokonanie wyboru optymalnych technologii produkcji w aspekcie agrotechnicznym, ekonomicznym i energetycznym. Ponadto ocena przydatności biomasy wierzby krzewiastej i ślazuwca pensylwańskiego do zgazowania w termogeneratorze.

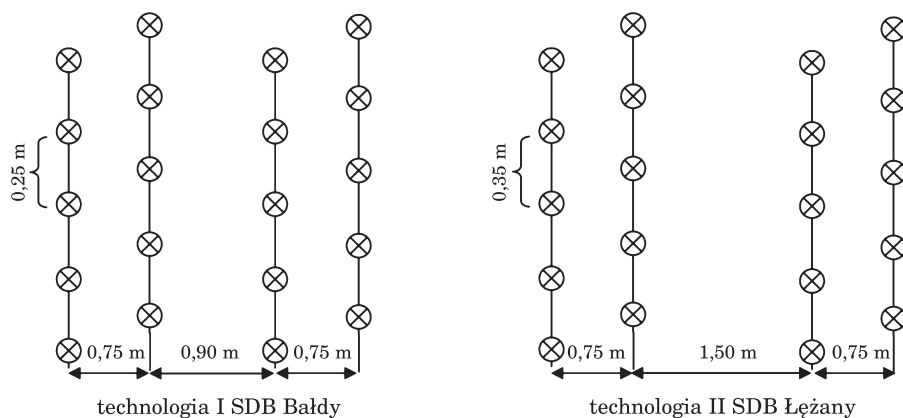
## **3. Metodyka**

### **3.1. Badania polowe i warunki ich prowadzenia**

Podstawą opracowania są wyniki eksperymentów polowych z wierzbą krzewiastą i ślazuwcem pensylwańskim prowadzonych w latach 2009–2011. Doświadczenia zlokalizowano w północno-wschodniej Polsce w miejscowości Bałdy (54°00'N, 20°36'E) i Łęczany (54°00'N 21°10'E) oddalonych od siebie o 80 km.

W ścisłych doświadczeniach polowych z wierzbą krzewiastą założonych w układzie całkowicie losowym uwzględniono dwie technologie produkcji biomasy uwzględniające zróżnicowaną obsadę roślin i częstotliwość zbioru. W technologii I, prowadzonej w Stacji Dydaktyczno-Badawczej w Bałdach (I SDB Bałdy), zastosowano obsadę roślin 48 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>, zbiór roślin co roku; a w technologii II stosowanej w Stacji Dydaktyczno-Badawczej w Łęczanach (II SDB Łęczany), obsada roślin wynosiła 25 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>, a zbiór roślin co 3 lata (rys. 1).





Rys. 1. Schemat pasowego sadzenia zrzezów w zagęszczeniu 48 tys. szt. · ha<sup>-1</sup> (technologia I SDB Bałdy) i 25 tys. szt. · ha<sup>-1</sup> (technologia II SDB Łęczany)

W obu technologiach uprawiano po 15 odmian i klonów wierzby: 1. UWM 93 (*Salix acutifolia*), 2. Duotur (*S. alba*), 3. UWM 155 (*S. dasyclados*), 4. UWM 195 (*S. fragilis*), 5. UWM 035 (*S. pentandra*), 6. UWM 198 (*S. triandra*), 7. UWM 006 (*S. viminalis*), 8. Sprint (*S. viminalis*), 9. Start (*S. viminalis*), 10. Kortur (*S. viminalis*), 11. Oltur (*S. viminalis*), 12. Turbo (*S. viminalis*), 13. Tur (*S. viminalis*), 14. UWM 054 (*S. viminalis* x *S. amigdalina*), 15. Monotur (*S. viminalis* x *S. purpura*).

W Stacji Dydaktyczno-Badawczej Bałdy badania kontynuowano na doświadczeniu założonym w 2008 roku. Zrzezy o długości 25 cm wysadzono w drugiej dekadzie kwietnia w zagęszczeniu 48 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>. Zastosowano pasowy system sadzenia przedstawiony na rys. 1. Po pierwszym roku wegetacji (2008) pędy wierzby zebrano, danych tych nie uwzględniono w niniejszym opracowaniu. Od drugiego roku zbierano wierzbę w trzech jednorocznych cyklach (2009, 2010 i 2011).

W Stacji Dydaktyczno-Badawczej w Łęczanach eksperyment realizowano również na doświadczeniu założonym w 2008 roku. Zrzezy o długości 25 cm wysadzano w zagęszczeniu 25 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>. Zastosowano pasowy system sadzenia zrzezów wg rys 1. W pierwszym roku wegetacji (2008) pędy wierzby zebrano, danych tych analogicznie jak w I technologii nie uwzględniono w niniejszej pracy. Zbiór 3-letnich pędów przeprowadzono w 2011 roku, czyli w czwartym roku wegetacji wierzby.

Przed zbiorem roślin określano liczbę roślin na poletku i wyliczano ich ubytki, następnie przeliczano te wartości na powierzchnię 1 ha. Ponadto wykonano pomiary biometryczne: liczbę pędów na karpie, wysokość roślin, średnicę pędu (pomiar wykonano na wysokości 0,5 m od powierzchni gleby), masę jednej rośliny. Plon biomasy pędów wierzby określano z każdego poletka i przeliczano go na powierzchnię 1 ha.

Podstawą badań ze ślazuem pensylwańskim było ścisłe doświadczenie polowe realizowane w Stacji Dydaktyczno-Badawczej Bałdy, założone w 4 powtórzeniach w układzie losowanych bloków. Wielkość poletka wynosiła 15 m<sup>2</sup>.

W doświadczeniu uwzględniono trzy rodzaje materiału siewnego oraz dwie gęstości wysiewu lub sadzenia; nasiona – wysiew 1,5 oraz 4,5 kg · ha<sup>-1</sup>, sadzonki korzeniowe – sadzenie w obsadzie 20 i 60 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>, rozsada – sadzenie w obsadzie 20 i 60 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>.

Wysiew nasion ślazuca (o zdolności kiełkowania 73%, uszlachetnionych wcześniej wg metodyki własnej przez skaryfikację w stężonym kwasie siarkowym) wprost do gruntu wykonano siewnikiem poletkowym dnia 20.04.2009 r.

Sadzenie wykopanych dzień wcześniej 8–10 cm fragmentów korzeni (sadzonek korzeniowych) przeprowadzono ręcznie pod znacznik na głębokość 10–15 cm dnia 17.04.2009 r.

Rozsadę przygotowaną w szklarni w paletkach rozsadowych, tzw. multiplatach (wysiew nasion 14.03.2009 r.), wysadzono ręcznie w polu 25.05.2009 r. Rozstawa rzędów we wszystkich obiektach wynosiła 0,75 m.

Liczono obsadę wschodzących roślin, w pracy uwzględniono obsadę roślin w okresie zbioru w pierwszym roku i kolejnych latach użytkowania. Przed zbiorem w każdym roku wykonano na 10 roślinach z każdego poletka pomiary cech morfologicznych, uwzględniając: liczbę pędów na 1 roślinie, wysokość oraz średnicę pędów na wysokości 50 cm od powierzchni ziemi.

Zbiór przeprowadzono 15.02.2010, 17.02.2011, 19.01.2012 za pomocą ręcznej kosiarki spalinowej. W trakcie zbioru pobrano próbki roślin do analiz laboratoryjnych. Plon świeżej masy po uwzględnieniu jego wilgotności przeliczono na plon suchej masy.

Roczne opady atmosferyczne w SDB Bałdy wynoszą 550–650 mm, okres wegetacyjny trwa od 210 do 220 dni, a średnia roczna temperatura powietrza około 9°C. Suma opadów w okresie wegetacji (IV–X) w czasie prowadzenia eksperymentu wahała się od 384,5 do 510,6 mm, a średnia temperatura powietrza w analogicznym okresie od 14,6 do 15,0°C.

Roczne opady atmosferyczne w SDB Łężany wynoszą 600–750 mm, okres wegetacyjny od 200 do 210 dni, a średnia roczna temperatura powietrza około 8°C. Suma opadów w okresie wegetacji (IV–X) w czasie prowadzenia eksperymentu wahała się od 447,3 do 527,2 mm, a średnia temperatura powietrza w analogicznym okresie od 13,6 do 14,4°C.

Doświadczenia z wierzbą krzewiastą i ślazuem w SDB w Bałdach prowadzono na glebie mułowo-murszowej, wytworzonej z gytii wapiennej na podłożu ilastym, klasy bonitacyjnej IVb, kompleksu przydatności rolniczej – użytki zielone średnie. Lustro wody gruntowej określono na głębokości poniżej 0,8 m. Odczyn gleby obojętny, pH –7,2 (w KCl). Zawartość węgla ogólnego w glebie wynosiła 92 g kg<sup>-1</sup>. Stosunek C:N wynosił 14,1. Zawartość P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Mg i Ca wynosiła odpowiednio: 8, 134, 4,3 i 422 mg 100 g<sup>-1</sup> gleby.

Doświadczenie z wierzbą w SDB w Łężanach prowadzono na glebie brunatnej właściwej typowej niecałkowitej, wytworzonej z gliny średniej na piasku gliniastym lekkim pylastym, klasy bonitacyjnej IVa, kompleksu pszennego wadliwego. Lustro wody gruntowej określono na głębokości poniżej 1,5 m. Odczyn gleby obojętny, pH  $-7,02$  (w KCl). Zawartość węgla ogólnego w glebie wynosiła  $7,33 \text{ g kg}^{-1}$ . Stwierdzono wąski stosunek C:N (7,8), co świadczy o wysokiej aktywności biologicznej gleby. Zawartość  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Mg i Ca wynosiła odpowiednio: 15,4, 18,0, 0,3 i  $495 \text{ mg } 100 \text{ g}^{-1}$  gleby.

Nawożenie mineralne wierzby stosowano po każdym zbiorze pędów w dawkach: N  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  w formie saletry amonowej,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $30 \text{ kg ha}^{-1}$  w formie superfosfatu potrójnego,  $\text{K}_2\text{O}$   $60 \text{ kg ha}^{-1}$  w formie soli potasowej. Nawożenie w SDB w Bałdach stosowano 3-krotnie, a w SDB w Łężanach 1-krotnie.

W przypadku ślazuca w każdym roku stosowano nawożenie mineralne w ilościach: N  $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $20 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$   $50 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Stosowano standardowe zabiegi agrotechniczne przy produkcji biomasy wierzby i ślazuca, które zostały wymienione w analizie ekonomicznej.

### 3.2. Ocena laboratoryjna biomasy

Pobrane przy zbiorze próby roślin wierzby i ślazuca poddano analizie laboratoryjnej.

Wilgotność biomasy wierzby i ślazuca oznaczono metodą suszarkowo-wagową w temperaturze  $105^\circ\text{C}$ . Rozdrobnione pędy suszono do uzyskania stałej masy wg PN-80/G-04511 [4].

Zawartość popiołu oznaczono przy użyciu analizatora termograwimetrycznego ELTRA TGA THERMOSTEP. Powyższe urządzenie pracuje zgodnie z PN-G-04560:1998, PN-ISO 562 [4].

Ciepło spalania biomasy badanych roślin określono zgodnie z PN-81/G-04513 w kalorymetrze IKA C2000 w oparciu o metodę dynamiczną. Na podstawie ciepła spalania biomasy i jej wilgotności określono jej wartość opalową zgodnie z PN-91/G-04510 [4].

Analizę elementarną (zawartość węgla, wodoru i siarki) w biomacie wykonano automatycznym analizatorem Eltra CHS 500 przeznaczonym do jednoczesnego oznaczania tych pierwiastków. Powyższe urządzenie pracuje zgodnie z normami PN-G-04584 i PN-G-04517 [4].

Oznaczenie zawartości azotu w biomacie wykonano w oparciu normę PN-EN ISO 20483 metodą Kjeldahla (z modyfikacją Zinneke) z użyciem mineralizatora K-435 oraz destylarki B-324 BUCHI [4].

Zawartość chloru w biomacie badanych roślin oznaczono metodą z zastosowaniem mieszaniny Eschki [4].

### **3.3. Analiza statystyczna**

Dla badanych cech obliczono średnie arytmetyczne oraz odchylenie standardowe. W celu udowodnienia istotności wpływu czynnika na badane cechy wierzby i ślazuca wykorzystano test wielokrotny Studenta Newman-Kulesa. Wszystkie wyniki badań opracowano statystycznie w oparciu o pakiet komputerowy STATISTICA 9,0 PL.

### **3.4. Analiza ekonomiczno-energetyczna**

Analizę efektywności ekonomicznej uprawy i produkcji zrębków wierzby przedstawiono na podstawie średniego (uzyskanego z wszystkich klonów), maksymalnego i minimalnego plonu świeżej biomasy uzyskanego z różnych klonów w badanych technologiach w latach 2009–2011.

Założono, że zbiór roślin wierzby będzie wykonywany jednoetapowo w cyklach jednorocznych za pomocą dwurzędowego silosokombajnu JF Double Z20 współpracującego z ciągnikiem, a w cyklach trzyletnich za pomocą kombajnu Claas Jaguar 830. Natomiast zbiór roślin ślazuca będzie wykonywany jednoetapowo za pomocą dwurzędowego silosokombajnu JF Double Z20 współpracującego z ciągnikiem.

Analizę ekonomiczną uprawy i produkcji zrębków ślazuca pensylwańskiego przedstawiono na podstawie plonu biomasy uzyskanego w poszczególnych obiektach doświadczenia w latach 2010 i 2011. Plonów ślazuca z pierwszego roku wegetacji (2009) nie uwzględniono ze względu na bardzo niski poziom plonowania roślin w roku zakładania plantacji.

W analizach ekonomicznych założono, że zrębki obu gatunków będą transportowane do zakładu konwersji biomasy na odległość 50 km.

Całość poniesionych kosztów bezpośrednich podzielono na etapy. Pierwszy z nich obejmował założenie plantacji, a drugi jej użytkowanie. Poniesione koszty bezpośrednie na założenie oraz prowadzenie plantacji w pierwszym roku wegetacji przedstawiono w całości oraz podzielono na potencjalnie 19-letni okres ich użytkowania. Sposób obliczania kosztów bezpośrednich wykonano w oparciu o koszty własne, bez naliczania zysku usługodawcy. Wykorzystano zestawione tabelarycznie jednostkowe koszty eksploatacji sprzętu rolniczego [16]. Ponadto wykorzystano dane literaturowe, informacje rynkowe oraz własne założenia w zakresie wydajności sprzętu rolniczego, zakupu i stosowania nawozów i środków ochrony, cen materiału rozmnożeniowego, likwidacji plantacji po zakończeniu jej użytkowania oraz zbioru i transportu biomasy. Koszt pracy ludzkiej ustalono w oparciu o założenia, że pełnozatrudniona osoba w rolnictwie pracuje 176 godzin w miesiącu

(22 dni  $\times$  8 godzin dziennie). Natomiast średnie miesięczne wynagrodzenie w rolnictwie wynosiło 3305,4 zł. W związku z powyższym koszt pracy ludzkiej ustalono na 18,78 zł  $\cdot$  godz.<sup>-1</sup>

Koszt zakupu nasion ślazu ustalono na poziomie 1200 zł  $\cdot$  kg<sup>-1</sup>, sadzonek korzeniowych 0,25 zł za sztukę, a rozsady 0,50 zł za sztukę.

Wartość świeżych zrębków ślazu przy cenie 20 zł  $\cdot$  GJ<sup>-1</sup> obliczono oddzielnie dla każdego obiektu w zależności od wartości opałowej biomasy.

Wartość świeżych zrębków wierzbowych przy cenie 20 zł  $\cdot$  GJ<sup>-1</sup> ustalono na poziomie: 162 i 171,6 zł/t, odpowiednio w technologii I i II. Wartość plonu świeżej biomasy loco plantacja wyliczono jako iloczyn plonu biomasy i ceny za 1 tonę zrębków. W ekonomicznej ocenie produkcji zrębków uwzględniono: jednostkowy bezpośredni koszt produkcji 1 tony świeżych zrębków – będący ilorazem kosztów bezpośrednich loco plantacja i plonu zrębków oraz nadwyżkę bezpośrednią produkcji zrębków – będącą różnicą pomiędzy wartością uzyskanego plonu, kosztami bezpośrednimi loco plantacja. Obliczona wartość nie określa dochodu producenta, a jedynie wskazuje sposoby postępowania, z których można uzyskać najkorzystniejszy efekt z poniesionych nakładów. W ocenie ekonomicznej produkcji zrębków nie uwzględniono dopłat obszarowych.

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne uprawy i produkcji zrębków określono według metodyki [17, 18, 19, 20]. W analizie nakładów materiałowo-energetycznych ponoszonych na założenie plantacji i produkcję biomasy wyodrębniono następujące strumienie energii: bezpośrednie nośniki energii (paliwa), zużycie środków trwałych i materiałów do ich napraw (ciągniki, maszyny, narzędzia), stosowanie nawozów mineralnych i innych agrochemikaliów, zużycie roślinnych surowców rolniczych (sadzunki) i praca ludzi.

Iloczyn wartości opałowej świeżej biomasy oraz jej plon z powierzchni 1 ha stanowił wartość energetyczną plonu. W energetycznej ocenie technologii uprawy oraz produkcji zrębków na plantacji wykorzystano następujące wskaźniki: zysk energii skumulowanej, który stanowił różnicę pomiędzy wartością energetyczną uzyskanego plonu a sumą nakładów na jego uzyskanie, wskaźnik energochłonności jednostkowej, który stanowił iloraz sumy nakładów energii do masy uzyskanego plonu oraz wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków, który stanowił iloraz wartości energetycznej uzyskanego plonu biomasy do wartości skumulowanych nakładów materiałowo-energetycznych poniesionych na jego pozyskanie.

### 3.5. Zgazowanie biomasy w termogeneratorze

Badania procesu zgazowania biomasy wierzby oraz słazowca pensylwańskiego pozyskanej z doświadczeń własnych przeprowadzone były w instalacji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie przy współpracy z pracownikami Instytutu Energetyki – Instytutu Badawczego w Warszawie. Instalacja składa się z ośmiu elementów (fot. 1).



Fot. 1. Instalacja zgazowywania biomasy: 1 – reaktor zgazowania-przeciwprądowy (gazogenerator) o mocy 500 kW z ciągłym podawaniem paliwa, uszczelnieniem wodnym i mechanicznym odbiorem popiołu, 2 – podajnik biomasy, 3 – stożek odprowadzania popiołu z dyszami powietrza dopalającego, 4 – wanna uszczelnienia wodnego, 5 – rurociąg gazu, 6 – palnik gazu procesowego, 7 – palnik pilotowy olejowy, 8 – kocioł wodny

Instalacja wyposażona była w komputerowy system sterowania, zabezpieczeń oraz wizualizacji i archiwizacji danych, pozwalający w pełni kontrolować proces. System sterowania umożliwiał regulacje wydatkiem wentylatorów powietrza do reaktora i palnika oraz sterowanie podajnikami i wygarzniaczem popiołu. System kontroli pokazuje bieżące i archiwalne wartości następujących danych: wysterowanie wentylatorów, ciśnienia i temperatury

w instalacji, moc kotła,ysterowanie i prąd podajników i mieszadła. Dodatkowo przed badaniami zainstalowano wielopunktową sondę termoparową mierzącą temperatury wewnątrz reaktora na różnych głębokościach, analizator cyrkonowy tlenu w kanale spalin za kotłem oraz wykonano punkty pomiarowe do mierzenia wydatków powietrza do reaktora i palnika gazu.

Zakres badań obejmował badania konieczne do sporządzenia bilansów masy i energii procesu zgazowania zrębków w gazogeneratorze o mocy 500 kW, czyli badanie składu gazu z reaktora, badanie składu spalin za palnikiem, pomiary temperatury w reaktorze, pomiary przepływu powietrza do reaktora i palnika, badania bilansowe gazogeneratora. Metody wykonania pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Metody wykonania pomiarów zgazowania biomasy wierzby

Strumień	Oznaczenie	Metoda
Paliwo	$F_b$ – przepływ paliwa (biomasy) [kg/h]	pomiar masy wagą hakową i czas pomiędzy kolejnymi porcjami
Powietrze do reaktora	$F_p$ – przepływ powietrza do reaktora [Nm <sup>3</sup> /h]	sonda Prandtla
Powietrze do palnika	$F_{pp}$ – przepływ powietrza do palnika [Nm <sup>3</sup> /h]	sonda Prandtla
Gaz z reaktora	$A_1$ – analiza gazu: H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , N <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> [% mol]	okresowo co 3 min, GC w aparacie Varian CP-4900
Gaz z reaktora	$A_1$ – analiza spalin: CO, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> [%]	on-line, analizator Ultramat 23
Gaz z reaktora	$A_1$ – analiza spalin: H <sub>2</sub> [%]	on-line, analizator Colomat 6
Gaz z reaktora	$A_1$ – para wodna	metoda Fischera, oznaczenie w absorbencjach alkoholowym
Gaz z reaktora	$A_1$ – smoły	grawimetrycznie zgodnie z Tar Protocol
Spaliny za palnikiem	$A_2$ – analiza spalin: CO, NO, [ppm], O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> [%]	on-line, analizator Ultramat 23
Woda kotłowa	$M$ – moc [kW]	kotłowy licznik ciepła
	$T_g$ – temperatura gazu wylotowego [°C] $t_g, t_{sr}, t_d, t_1, t_4$ – temperatury w reaktorze [°C] $T_s$ – temperatura spalin [°C]	termopary typu K

Skład gazu oznaczono analizatorami Siemens Ultramat 23, Siemens Calomat 6 oraz chromatografem gazowym VARIAN CP 4000. Gazy pobierano z kanału gazu i kanału spalin za pomocą przenośnego systemu kondycjonowania gazów firmy M&C typ PSS-5. Przepływy powietrza mierzono sondą Prandtla firmy TESTO i miernikiem różnicy ciśnień Testo 512. Pomiary

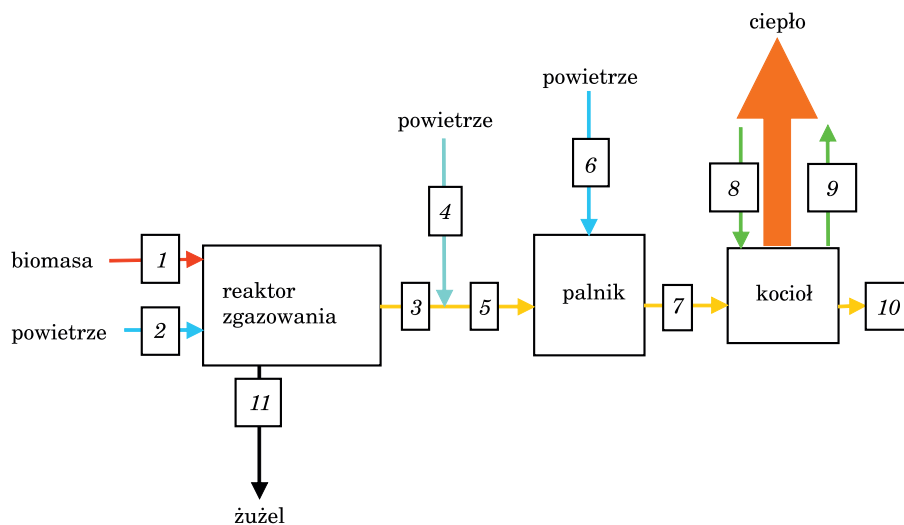
temperatur wewnątrz reaktora wykonano specjalną wielopunktową sondą termoparową i cyfrowym miernikiem CHY 506A.

Analizę smół wykonywano zgodnie z procedurami opisanymi w normie PKN-CEN/TS 15439:2007 (U) (CEN/TS 15439:2006 (E)) „Biomass gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis”, Warszawa, 2007 [21].

Paliwem użytym do zgazowania była partia średnia zrębków wierzby pozyskana z 15 klonów 3-letnich pędów pozyskanych w technologii II SDB Łęczany. W przypadku ślazuca zrębki otrzymano z sezonowanych pędów pochodzących z opisanego wyżej doświadczenia polowego. Zrębki ślazuca uzyskane po rozdrobieniu pędów rębakiem zawierały dużą ilość skłębionych włókien i powodowały silne wzajemne czepianie się i ograniczenie ich syckości. Powodowało to tworzenie się brył zawieszających się w podajnikach do zgazowarki i uniemożliwiało w miarę równo dozowanie paliwa z powodu powyższych trudności i u ślazuca oznaczono tylko skład gazu w stanie nie ustalonym.

Bilanse masy i energii procesu zgazowania zrębków wierzby wykonano w stanie ustalonym, którego kryterium były: stały poziom paliwa w reaktorze, ustalone temperatury i skład gazu na wylocie z gazogeneratora, utrzymujące się w czasie ponad 1 godzinę.

Schemat procesu zgazowania i spalania w badanej instalacji pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat procesu zgazowania i spalania biomasy



Biomasa – strumień 1 – podawana jest do reaktora zgazowania wraz z powietrzem – strumień 2. Produkt zgazowania – strumień 3. Części nieorganiczne paliwa pozostają w dolnej części reaktora w postaci popiołu – strumień 11, popiół zostaje okresowo usuwany. Produkt zgazowania ulega rozcieńczeniu powietrzem – strumień 4, które dostaje się do trasy gazu poprzez nieszczelności na skutek podciśnienia w reaktorze. Rozcieńczony gaz – strumień 5 – ulega spalaniu w palniku w obecności powietrza podawanego do palnika – strumień 6. Gorące spaliny – strumień 7 – chłodzone są w komorze kotła i po schłodzeniu kierowane są do komina – strumień 10. Ciepło spalin odbierane jest przy pomocy wody obiegowej – strumienie 8 i 9.

Określono koszty wytworzenia 1 GJ energii cieplej ze zgazowania zrębków wierzby w gazogeneratorze o mocy 500 kW. W wariantcie I założono, że instalacja będzie pracowała przez 330 dni w roku (30-dniowa przerwa pracy instalacji na jej przegląd). Natomiast w wariantcie II założono, że instalacja będzie pracować tylko w okresie grzewczym (231 dni pracy w roku).

## **4. Omówienie wyników**

### **4.1. Produkcyjność i analiza ekonomiczno-energetyczna produkcji wierzby krzewiastej**

#### **4.1.1. Plon i elementy jego struktury**

Liczba roślin wierzby po zakończeniu czwartego okresu wegetacji w technologii I SDB Bałdy wyniosła średnio 31,1 tys. szt. roślin  $\text{ha}^{-1}$  i była ona zgodnie założeniami doświadczenia wyższa niż w technologii II SDB Łężany (21,7 tys. szt. roślin  $\text{ha}^{-1}$ ). Ubytki roślin w technologii I i II wyniosły odpowiednio około 35% i 13,32% (tab. 2).

Tabela 2

Liczba roślin wierzby krzewiastej w okresie jej zbioru (tys. szt. ha<sup>-1</sup>)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Baldy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (obsada z roku 2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 24 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata
<i>S. acutifolia</i>	093	18,54 ± 6,50 <sup>d</sup>	14,38 ± 1,82 <sup>c</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	30,83 ± 2,45 <sup>bc</sup>	23,01 ± 0,72 <sup>a</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	39,38 ± 5,06 <sup>ab</sup>	22,57 ± 1,14 <sup>a</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	30,83 ± 4,67 <sup>bc</sup>	21,90 ± 0,85 <sup>a</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	23,75 ± 7,62 <sup>cd</sup>	21,68 ± 2,11 <sup>a</sup>
<i>S. triandra</i>	198	17,29 ± 3,56 <sup>d</sup>	16,37 ± 0,51 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	34,17 ± 1,52 <sup>b</sup>	22,35 ± 2,54 <sup>a</sup>
	Sprint	34,38 ± 0,80 <sup>b</sup>	23,01 ± 0,72 <sup>a</sup>
	Start	34,58 ± 6,96 <sup>b</sup>	22,79 ± 0,44 <sup>a</sup>
	Kortur	30,63 ± 4,10 <sup>bc</sup>	22,79 ± 0,44 <sup>a</sup>
	Oltur	31,67 ± 2,04 <sup>bc</sup>	21,46 ± 0,44 <sup>a</sup>
	Turbo	32,71 ± 3,29 <sup>b</sup>	23,45 ± 0,51 <sup>a</sup>
	Tur	37,92 ± 3,08 <sup>ab</sup>	22,79 ± 1,51 <sup>a</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	40,83 ± 2,26 <sup>a</sup>	23,23 ± 0,44 <sup>a</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	30,83 ± 6,70 <sup>bc</sup>	23,23 ± 0,85 <sup>a</sup>
Średnio		31,22 ± 7,72	21,67 ± 2,78

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

W technologii I SDB Bałdy niską obsadę roślin 17,3 i 18,5 tys. szt. roślin  $\text{ha}^{-1}$  stwierdzono odpowiednio u klonu UWM 198 *S. triandra* i klonu UWM 093 *S. acutifolia*. Obserwowano, że klony te były intensywnie zgryzane przez zwierzyną płową, co mogło być przyczyną liczego wypadania roślin.

W technologii I, gdzie rośliny były zbierane co roku, pomimo większej obsady roślin liczba pędów na roślinie (karpie) była prawie 2,5-krotnie wyższa niż w technologii II przy mniejszej obsadzie roślin (tab. 3).

W technologii I liczba pędów na roślinie była zawarta w przedziale od 2,3 sztuk u klonu UWM 093 *S. acutifolia* do 5,96 sztuk u klonu UWM 195 *S. fragilis*. W technologii II wysoką liczbę pędów na roślinie stwierdzono o odmian Start i Kortur (po 2, 3 sztuki na roślinie).

Tabela 3

Liczba pędów na karpie wierzby krzewiastej w okresie jej zbioru

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co roku (obsada z roku 2011)	II SDB Łężany obsada roślin 25 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co 3 lata (obsada z roku 2011)
<i>S. acutifolia</i>	093	2,34 ± 0,52 <sup>c</sup>	1,10 ± 0,14 <sup>c</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	4,49 ± 0,74 <sup>b</sup>	2,10 ± 0,64 <sup>ab</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	2,96 ± 0,42 <sup>c</sup>	1,43 ± 0,33 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	5,96 ± 1,78 <sup>a</sup>	1,35 ± 0,13 <sup>cd</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	4,23 ± 0,90 <sup>b</sup>	1,55 ± 0,24 <sup>bc</sup>
<i>S. triandra</i>	198	5,62 ± 1,40 <sup>a</sup>	1,03 ± 0,05 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	2,69 ± 0,46 <sup>c</sup>	1,30 ± 0,00 <sup>cd</sup>
	Sprint	4,26 ± 0,62 <sup>b</sup>	1,88 ± 0,26 <sup>b</sup>
	Start	4,07 ± 0,64 <sup>b</sup>	2,30 ± 0,23 <sup>a</sup>
	Kortur	5,65 ± 1,33 <sup>a</sup>	2,30 ± 0,42 <sup>a</sup>
	Oltur	4,11 ± 0,94 <sup>b</sup>	1,63 ± 0,22 <sup>bc</sup>
	Turbo	3,84 ± 0,68 <sup>b</sup>	1,45 ± 0,19 <sup>c</sup>
	Tur	3,66 ± 0,61 <sup>b</sup>	2,05 ± 0,19 <sup>ab</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	3,03 ± 0,37 <sup>c</sup>	1,98 ± 0,29 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpure</i>	Monotur	5,60 ± 1,61 <sup>a</sup>	1,93 ± 0,51 <sup>b</sup>
Średnio		4,17 ± 1,45	1,69 ± 0,48

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Wysokość roślin jednorocznych (średnio 3,09 m) w technologii I była ponad 2-krotnie niższa niż roślin 3-letnich (6,31 m) w technologii II (tab. 4).

Tabela 4

Wysokość roślin wierzby krzewiastej w okresie jej zbioru (m)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łężany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	2,51 ± 0,35 <sup>d</sup>	4,93 ± 1,21 <sup>d</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	3,13 ± 0,13 <sup>b</sup>	6,78 ± 0,29 <sup>b</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	2,93 ± 0,22 <sup>c</sup>	6,21 ± 1,46 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	2,83 ± 0,21 <sup>c</sup>	6,76 ± 0,56 <sup>b</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	3,20 ± 0,19 <sup>b</sup>	6,77 ± 0,49 <sup>b</sup>
<i>S. triandra</i>	198	3,03 ± 0,16 <sup>b</sup>	5,83 ± 0,38 <sup>cd</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	3,62 ± 0,15 <sup>a</sup>	7,67 ± 0,36 <sup>a</sup>
	Sprint	2,99 ± 0,16 <sup>c</sup>	6,09 ± 0,59 <sup>cd</sup>
	Start	3,37 ± 0,89 <sup>ab</sup>	5,54 ± 0,84 <sup>cd</sup>
	Kortur	3,17 ± 0,11 <sup>b</sup>	6,87 ± 0,14 <sup>ab</sup>
	Oltur	3,24 ± 0,14 <sup>b</sup>	6,68 ± 0,16 <sup>b</sup>
	Turbo	3,23 ± 0,24 <sup>b</sup>	6,81 ± 0,14 <sup>b</sup>
	Tur	3,21 ± 0,08 <sup>b</sup>	6,58 ± 0,36 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	2,97 ± 0,55 <sup>c</sup>	6,24 ± 0,47 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpure</i>	Monotur	2,85 ± 0,20 <sup>c</sup>	4,96 ± 1,73 <sup>d</sup>
Średnio		3,09 ± 0,40	6,31 ± 0,99

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

W technologii I najwyższe rośliny były u klonu UWM 006 *S. viminalis* i odmiany Start (odpowiednio 3,62 i 3,37 m). W następnej grupie jednorodnej było 7 genotypów wierzby w przedziale wysokości roślin od 3,13 m u odmiany Duotur do 3,24 m u odmiany Oltur. W technologii II najwyższe 3-letnie rośliny (7,67 m) dał klon UWM 006 *S. viminalis*. U pozostałych genotypów wierzby wysokość roślin wahała się od 4,93 m u klonu UWM 093 *S. acutifolia* do 6,87 u odmiany Kortur.

Średnica pędów jednorocznych (średnio 11,96 mm) w technologii I była ponad 2-krotnie mniejsza niż pędu 3-letniego (średnio 28,53 mm) w technologii II (tab. 5).

Tabela 5

Średnica pędów wierzby krzewiastej w okresie jej zbioru (mm)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	9,90 ± 2,67 <sup>d</sup>	19,83 ± 8,21 <sup>e</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	13,04 ± 0,83 <sup>b</sup>	36,78 ± 1,55 <sup>b</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	13,03 ± 1,54 <sup>b</sup>	30,34 ± 3,32 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	10,37 ± 1,37 <sup>cd</sup>	29,10 ± 6,75 <sup>d</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	13,41 ± 1,69 <sup>b</sup>	35,00 ± 4,18 <sup>bc</sup>
<i>S. triandra</i>	198	11,37 ± 1,47 <sup>c</sup>	20,05 ± 1,67 <sup>e</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	15,84 ± 1,16 <sup>a</sup>	43,53 ± 4,67 <sup>a</sup>
	Sprint	11,23 ± 1,20 <sup>c</sup>	24,85 ± 1,48 <sup>de</sup>
	Start	12,03 ± 0,68 <sup>bc</sup>	24,88 ± 2,39 <sup>de</sup>
	Kortur	11,38 ± 1,21 <sup>c</sup>	28,68 ± 1,48 <sup>d</sup>
	Oltur	12,50 ± 1,18 <sup>b</sup>	29,90 ± 2,79 <sup>c</sup>
	Turbo	13,03 ± 1,16 <sup>b</sup>	30,55 ± 2,99 <sup>c</sup>
	Tur	12,14 ± 0,82 <sup>bc</sup>	28,25 ± 2,90 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	10,90 ± 1,06 <sup>c</sup>	26,43 ± 0,69 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	9,28 ± 0,84 <sup>d</sup>	19,80 ± 1,80 <sup>e</sup>
Średnio		11,96 ± 2,04	28,53 ± 7,16

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Do pierwszej grupy jednorodnej w technologii I zaliczono klon UWM 006 *S. viminalis* (15,84 mm), do drugiej pięć genotypów wierzby w przedziale grubości od 12,5 mm u odmiany Oltur do 13,04 mm u odmiany Duotur.

Klon UWM 006 *S. viminalis* w technologii II wydał pędy 3-letnie najgrubsze o średnicy 43,53 mm. Do kolejnej grupy jednorodnej zaliczono odpowiednio odmianę Duotur i klon UWM 035 *S. pentandra*. Pozostałe genotypy wierzby miały istotnie niższe średnice pędów.

Świeża masa jednej rośliny wierzby (średnio 0,72 kg) w technologii I SDB Bałdy, gdzie rośliny pozyskiwano corocznie, była ponad 4,5-krotnie niższa niż w technologii II SDB Łęczany, w której pozyskiwano 3-letnie rośliny (3,27 kg) (tab. 6).

Tabela 6

Świeża masa jednej rośliny wierzby krzewiastej w okresie jej zbioru (kg)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	0,23 ± 0,11 <sup>d</sup>	0,48 ± 0,18 <sup>e</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	0,68 ± 0,16 <sup>bc</sup>	4,72 ± 0,30 <sup>b</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	0,54 ± 0,06 <sup>c</sup>	3,83 ± 0,38 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	0,98 ± 0,30 <sup>a</sup>	2,87 ± 0,19 <sup>d</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	0,74 ± 0,32 <sup>b</sup>	3,96 ± 0,72 <sup>c</sup>
<i>S. triandra</i>	198	0,98 ± 0,53 <sup>a</sup>	0,42 ± 0,06 <sup>e</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	0,79 ± 0,17 <sup>b</sup>	7,26 ± 0,89 <sup>a</sup>
	Sprint	0,55 ± 0,11 <sup>c</sup>	3,31 ± 0,05 <sup>cd</sup>
	Start	0,82 ± 0,16 <sup>b</sup>	2,65 ± 0,53 <sup>d</sup>
	Kortur	0,94 ± 0,17 <sup>a</sup>	3,78 ± 0,18 <sup>c</sup>
	Oltur	0,77 ± 0,19 <sup>b</sup>	3,83 ± 0,45 <sup>c</sup>
	Turbo	0,78 ± 0,11 <sup>b</sup>	3,78 ± 0,22 <sup>c</sup>
	Tur	0,67 ± 0,11 <sup>bc</sup>	3,48 ± 0,34 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	0,60 ± 0,07 <sup>c</sup>	3,60 ± 0,73 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	0,73 ± 0,24 <sup>b</sup>	1,02 ± 0,22 <sup>e</sup>
Średnio		0,72 ± 0,28	3,27 ± 1,72

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Klony UWM 195 *S. fragilis* i UWM 198 *S. triandra* oraz odmianę Kortur w technologii I SDB Bałdy zaliczono do pierwszej grupy jednorodnej o wysokiej masie jednej rośliny. W technologii II SDB Łęczany klon UWM 006 *S. viminalis* dał bardzo wysoką masę 3-letniej rośliny (7,26 kg): była ona ponad 1,5-krotnie wyższa niż u odmiany Duotur (4,72).

Wilgotność biomasy wierzby (średnio 52,3%) pozyskiwanej co roku w technologii I była o 2,3% wyższa niż biomasy pozyskiwanej co 3 lata w technologii II (tab. 7). Wilgotność biomasy pozyskanej w cyklu corocznym w technologii I zawarta była w przedziale od 49,6% u klonu UWM 035 *S. pentandra* do 54,7% u klonu UWM 155 *S. dasyclados*.

Tabela 7

Wilgotność biomasy wierzby krzewiastej w czasie jej zbioru (%)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	51,01 ± 1,90 <sup>d</sup>	49,02 ± 0,03 <sup>g</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	52,93 ± 1,25 <sup>bc</sup>	51,35 ± 0,18 <sup>c</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	54,56 ± 2,83 <sup>a</sup>	53,79 ± 0,07 <sup>a</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	52,62 ± 1,29 <sup>c</sup>	48,18 ± 0,20 <sup>b</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	49,56 ± 1,17 <sup>c</sup>	47,44 ± 0,06 <sup>i</sup>
<i>S. triandra</i>	198	51,98 ± 1,61 <sup>cd</sup>	48,25 ± 0,05 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	52,31 ± 1,22 <sup>c</sup>	51,05 ± 0,21 <sup>c</sup>
	Sprint	51,44 ± 0,80 <sup>cd</sup>	47,82 ± 0,20 <sup>i</sup>
	Start	52,84 ± 1,92 <sup>bc</sup>	51,22 ± 0,00 <sup>c</sup>
	Kortur	53,79 ± 1,66 <sup>b</sup>	52,55 ± 0,41 <sup>b</sup>
	Oltur	53,52 ± 2,10 <sup>b</sup>	52,41 ± 0,37 <sup>b</sup>
	Turbo	52,91 ± 1,96 <sup>bc</sup>	49,47 ± 0,16 <sup>f</sup>
	Tur	51,17 ± 0,98 <sup>d</sup>	47,06 ± 0,17 <sup>k</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	50,89 ± 0,70 <sup>d</sup>	50,60 ± 0,21 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	53,29 ± 1,22 <sup>b</sup>	49,99 ± 0,14 <sup>e</sup>
Średnio		52,32 ± 2,00	50,01 ± 2,01

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

W technologii II niższą wilgotność biomasy 3-letnich pędów oznaczono u odmiany Tur i klonu UWM 035 *S. pentandra*, a najwyższą analogicznie jak w technologii I u klonu UWM 155 *S. dasyclados* (tab. 7).

Plon suchej masy jednorocznych pędów wierzby wysadzonej w obsadzie 48 tys. zrzczerwów na 1 ha w technologii I SDB Bałdy wyniósł średnio 11,88 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> i był tylko nieznacznie niższy niż uzyskany po wysadzeniu 25 tys. szt. roślin na ha i zbiorze pędów 3-letnich w technologii II SDB Łęczany (średnio 12,14 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> (tab. 8).

W technologii I w SDB Bałdy, przy corocznym zbiorze istotnie najwyższy plon suchej masy pędów uzyskano u odmiany Start (15,39 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>), a o 0,36 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> niższy zaś plon u odmiany Kortur. Do trzeciej i czwartej grupy jednorodnej zaliczono odpowiednio, klon UWM 195 *S. fragilis* (14,76 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>) i klon UWM 006 *S. viminalis* (13,91 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>).

Tabela 8

Plon suchej biomasy wierzby krzewiastej ( $t \cdot ha^{-1} \text{ rok}^{-1}$ )

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $ha^{-1}$ zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. $ha^{-1}$ zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	2,83 ± 1,25 <sup>j</sup>	1,13 ± 0,29 <sup>f</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	11,95 ± 1,11 <sup>e</sup>	17,66 ± 0,75 <sup>b</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	10,11 ± 1,42 <sup>h</sup>	13,35 ± 1,29 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	14,76 ± 2,91 <sup>b</sup>	10,94 ± 1,09 <sup>d</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	9,51 ± 1,83 <sup>i</sup>	14,91 ± 1,26 <sup>c</sup>
<i>S. triandra</i>	198	9,99 ± 2,72 <sup>h</sup>	1,19 ± 0,19 <sup>f</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	13,91 ± 1,49 <sup>c</sup>	26,32 ± 1,10 <sup>a</sup>
	Sprint	10,66 ± 1,32 <sup>g</sup>	13,30 ± 0,32 <sup>c</sup>
	Start	15,39 ± 0,71 <sup>a</sup>	9,86 ± 1,93 <sup>d</sup>
	Kortur	15,03 ± 1,03 <sup>ab</sup>	13,67 ± 0,75 <sup>c</sup>
	Oltur	13,49 ± 1,43 <sup>c</sup>	13,07 ± 1,26 <sup>c</sup>
	Turbo	13,76 ± 0,70 <sup>c</sup>	15,01 ± 1,06 <sup>c</sup>
	Tur	13,43 ± 0,93 <sup>c</sup>	14,0 ± 0,58 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	12,35 ± 1,21 <sup>d</sup>	13,79 ± 2,63 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	11,08 ± 2,45 <sup>f</sup>	3,96 ± 0,77 <sup>e</sup>
Średnio		11,88 ± 3,44	12,14 ± 6,33

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodnie

Źródło: [22].

W technologii II w SDB Łęczany, gdzie wierzbę zbierano w cyklu 3-letnim, istotnie najwyższy plon suchej biomasy ( $26,32 t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$ ) stwierdzono u klonu UWM 006 *S. viminalis*, który był o 32,9% wyższy niż u odmiany Duotur, którą zaliczono do drugiej grupy jednorodnej.

Trzecią grupę jednorodną stanowiło osiem genotypów wierzby, które plonowały w przedziale od 13,03 do 14,91  $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$  s.m. Plony te były odpowiednio o 50,5% i 43,3% niższe w porównaniu do najwyższej plonującego klonu UWM 006 *S. viminalis*. Plon suchej biomasy klonu UWM 006 *S. viminalis* pozyskany w technologii II był o 10,9  $t \cdot ha^{-1} \cdot rok^{-1}$  wyższy niż u najwyższej plonującej odmiany Start w technologii I.

Plon suchej masy wierzby był różnicowany przez technologie uprawy oraz przez odmiany i klony. Plon suchej biomasy w technologii I, przy średniej obsadzie 31,2 tys. szt.  $ha^{-1}$  i zbiorze roślin co roku, wyniósł średnio 11,88  $t \cdot ha^{-1} \text{ rok}^{-1}$ . Był on bardzo zróżnicowany, ponieważ odmiana Start



plonowała wyżej od średniej o  $3,15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ , a klon UWM 093 *S. acutifolia* aż o  $9,05 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  niżej. Wysoki potencjał plonowania w tym cyklu zbioru potwierdziły odmiana Kortur oraz klon UWM 195 *S. fragilis*.

W technologii II, w której rzeczywista obsada roślin wyniosła średnio  $21,7 \text{ tys. szt} \cdot \text{ha}^{-1}$  i wierzbę zbierano w cyklu trzyletnim, plon suchej biomasy był średnio tylko o 2,14% wyższy niż w technologii I, gdzie zbierano rośliny co roku. Stwierdzono jednakże wysoce istotną różnicę w plonowaniu badanych odmian i klonów. Nowy klon UWM 006 *S. viminalis* dał  $26,32 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  suchej biomasy, czyli o  $8,66 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  (32,9%) więcej niż najwyżej plonująca w tej technologii odmiana Duotur. Ponadto plon tego klonu był 1,7-krotnie wyższy (o  $10,39 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ) od najwyżej plonującej odmiany Start w technologii I, pomimo że nawożenie NPK w technologii I było trzykrotnie wyższe niż w technologii II.

Adegbidi i in. [23] wykazali również zróżnicowanie produktywności wierzby w zależności od cyklu zbioru roślin. Klon SVI *S. dasyclados* dał w cyklu jednorocznym plon  $12,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Wydłużenie cyklu zbioru do dwuletniego zwiększyło plon tego klonu o 28,8%, przy zbiorze trzyletnim o 73% ( $21,6 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ). Badania Koppa i in. [23, 24] wykazały również, że uprawa klonu SVI *S. dasyclados* w trzech różnych gęstościach sadzenia zrzesów i trzech rotacjach zbioru różnicowała produktywność roślin. Plon suchej biomasy pozyskiwany co roku wyniósł  $12,53 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Natomiast w dwuletnim cyklu zbioru był on o  $3,57 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  wyższy, a pozyskany co trzy lata był o  $8,97 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  wyższy.

Faber i Kuś [25] podają również, że wydłużanie cyklu zbioru z jednorocznego, gdzie uzyskano  $11\text{--}12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  suchej biomasy, do trzyletniego powodowało wzrost plonu o 20%. Stolarski [5] stwierdził również wzrost plonowania wierzby wraz z wydłużaniem cyklu zbioru. Plon suchej biomasy w cyklu trzyletnim wynosił  $20,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . W rotacji dwuletniej był on o 3,4%, a w corocznej o 17,5% niższy. MacPherson [26], Labrecque i Teodorescu [27], Wilkinson i in. [28] preferują również trzyletnią rotację zbioru roślin wierzby.

Badania prowadzone w Stanach Zjednoczonych [23, 24] wykazały, że na produktywność wierzby zbieranej co roku znaczący wpływ ma m.in. stanowisko glebowe, wybór odpowiedniego klonu do nasadzeń, nawożenie i nawadnianie. Rośliny wysadzono w trzech gęstościach: 107 600, 36 960, 15 000 szt.  $\text{ha}^{-1}$  oraz zbierano w trzech jednorocznych rotacjach. Plony suchej biomasy wahały się średnio od  $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  (eksperyment nie nawadniany dla klonu SA22) do  $27,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  (nawadniany eksperyment z klonem SVI *S. dasyclados*). Ostatni ten klon charakteryzował się najwyższym plonem i najefektywniejszym wykorzystaniem składników pokarmowych przy gęstości sadzenia 36 900 szt.  $\text{ha}^{-1}$ .

Uprawa wierzby w dużym zagęszczeniu 48 tys. szt. · ha<sup>-1</sup> i corocznym zbiorze pędów może być jednak uzasadniona w warunkach rozdrobnionego rolnictwa [4]. W tej technologii istnieje możliwość prowadzenia skutecznych zabiegów agrotechnicznych na plantacji, dzięki którym można intensyfikować plony z jednostki powierzchni. Ponadto pozyskiwanie biomasy wierzby w cyklu jednorocznym pozwala na uzyskanie pierwszego zbioru produkcyjnego już w drugim roku od założenia plantacji, a nie w czwartym, jak to ma miejsce przy zbiorze jej w cyklu trzyletnim. Stwarza to możliwość uzyskania przez rolnika corocznego ekwiwalentu za dostarczone paliwo do lokalnej ciepłowni, jednakże niższego niż uzyskany w trzyletnim cyklu pozyskania biomasy.

Nowy klon UWM 195 *S. fragilis* włączony do badań w technologii I w czwartym jednorocznym okresie wegetacji miał obsadę roślin wynoszącą 30,8 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>. Na powierzchni jednego hektara wytworzył on średnio ponad 184 tys. szt. pędów o wysokości 2,8 m i średnicy 10,4 mm, co przełożyło się na plon 14,8 t · ha<sup>-1</sup> rok<sup>-1</sup> suchej biomasy. Wilgotność biomasy oznaczona przy zborze pędów wyniosła 52,6%.

W technologii II gdzie zbierano pędy w cyklu trzyletnim, nowy włączony do badań klon UWM 006 *S. viminalis* przy obsadzie roślin 22,4 tys. szt. · ha<sup>-1</sup>, na powierzchni jednego hektara wytworzył średnio 29,1 tys. szt. trzyletnich pędów o wysokości średnio 7,7 m i średnicy 43,5 mm, co przełożyło się na plon 26,3 t · ha<sup>-1</sup> rok<sup>-1</sup> suchej biomasy. Wilgotność biomasy oznaczona przy zborze pędów wyniosła 51,0%.

#### 4.1.2. Wartość opałowa i skład elementarny biomasy

Zawartość popiołu w biomase wierzby uzyskanej w technologii I wyniosła średnio 1,43% i była o 0,3 punktu procentowego wyższa niż w technologii II przy zbiorze roślin w cyklu trzyletnim (tab. 9).

Zawartość tego składnika u piętnastu badanych genotypów w technologii I zawarta była w przedziale od 1,21% do 1,97%, odpowiednio u odmiany Tur i klonu *S. fragilis* 195. Natomiast w technologii II jego zawartość wahała się od 0,93% u odmiany Sprint do 1,40% u klonu *S. acutifolia* 093 i odmiany Duotur.

Tabela 9

Zawartość popiołu w biomacie wierzby krzewiastej (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	1,25 ± 0,21 <sup>d</sup>	1,40 ± 0,01 <sup>a</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	1,56 ± 0,13 <sup>b</sup>	1,40 ± 0,01 <sup>a</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	1,49 ± 0,09 <sup>b</sup>	1,15 ± 0,01 <sup>d</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	1,97 ± 0,67 <sup>a</sup>	1,21 ± 0,06 <sup>c</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	1,31 ± 0,11 <sup>c</sup>	1,05 ± 0,01 <sup>f</sup>
<i>S. triandra</i>	198	1,10 ± 0,09 <sup>e</sup>	1,04 ± 0,05 <sup>f</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	1,32 ± 0,06 <sup>c</sup>	1,09 ± 0,02 <sup>e</sup>
	Sprint	1,43 ± 0,09 <sup>bc</sup>	0,93 ± 0,02 <sup>h</sup>
	Start	1,45 ± 0,05 <sup>bc</sup>	1,14 ± 0,01 <sup>d</sup>
	Kortur	1,52 ± 0,14 <sup>b</sup>	1,19 ± 0,00 <sup>c</sup>
	Oltur	1,54 ± 0,10 <sup>b</sup>	1,19 ± 0,01 <sup>c</sup>
	Turbo	1,58 ± 0,27 <sup>b</sup>	1,00 ± 0,00 <sup>g</sup>
	Tur	1,21 ± 0,10 <sup>d</sup>	1,26 ± 0,01 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	1,45 ± 0,06 <sup>bc</sup>	1,00 ± 0,01 <sup>g</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	1,33 ± 0,10 <sup>c</sup>	0,92 ± 0,02 <sup>h</sup>
Średnio		1,43 ± 0,28	1,13 ± 0,15

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Wyższa zawartość popiołu w biomacie wierzby pozyskiwanej w cyklu jednorocznym w porównaniu do cyklu trzyletniego może wynikać z wyższej zawartości kory w pędach jednorocznych niż trzyletnich. Klasnja i in. [29] wykazała, że zawartość popiołu w drewnie wierzby *S. alba* wahała się od 0,52 do 0,89%, a w korze od 4,77 do 5,94%. Tharakan i in. [30] wykazali, że zawartość popiołu w biomacie 30 klonów wierzby zbieranej w rotacji trzyletniej wynosiła średnio 2,0% i wahała się od 1,3 do 2,7%. Natomiast Ledin [31] oznaczył niższą zawartość popiołu w biomacie wierzby, która wahała się od 1,0 do 1,2%.

Tabela 10

Ciepło spalania biomasy wierzby krzewiastej ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ sm}$ )

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	20,04 ± 0,09 <sup>a</sup>	19,76 ± 0,02 <sup>b</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	19,58 ± 0,07 <sup>f</sup>	19,64 ± 0,00 <sup>e</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	19,53 ± 0,14 <sup>b</sup>	19,45 ± 0,02 <sup>f</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	19,56 ± 0,09 <sup>e</sup>	19,42 ± 0,04 <sup>f</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	19,88 ± 0,05 <sup>b</sup>	19,84 ± 0,05 <sup>a</sup>
<i>S. triandra</i>	198	19,46 ± 0,12 <sup>i</sup>	19,18 ± 0,01 <sup>g</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	19,68 ± 0,17 <sup>d</sup>	19,58 ± 0,03 <sup>d</sup>
	Sprint	19,53 ± 0,11 <sup>h</sup>	19,56 ± 0,02 <sup>d</sup>
	Start	19,56 ± 0,10 <sup>g</sup>	19,50 ± 0,04 <sup>e</sup>
	Kortur	19,60 ± 0,08 <sup>f</sup>	19,80 ± 0,03 <sup>a</sup>
	Oltur	19,73 ± 0,04 <sup>c</sup>	19,75 ± 0,03 <sup>b</sup>
	Turbo	19,69 ± 0,04 <sup>d</sup>	19,60 ± 0,01 <sup>d</sup>
	Tur	19,66 ± 0,10 <sup>e</sup>	19,59 ± 0,01 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	19,66 ± 0,10 <sup>e</sup>	19,46 ± 0,00 <sup>f</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	19,72 ± 0,15 <sup>c</sup>	19,82 ± 0,01 <sup>a</sup>
Średnio		19,66 ± 0,17	19,60 ± 0,18

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Ciepło spalania biomasy z jednorocznych (technologia I) i trzyletnich pędów (technologia II) było zbliżone, wyniosło ono średnio odpowiednio 19,66 i 19,60  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}^{-1}$  (tab. 10).

Wartość tej cechy u badanych piętnastu genotypów w technologii I mieściła się w wąskim przedziale od 19,46 do 20,04  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$  odpowiednio u klonu *S. triandra* 198 i klonu *S. acutifolia* 093. Natomiast w technologii II jej wartość wahała się od 19,18  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$  również u klonu *S. triandra* 198 do 19,84  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$  u klonu *S. pentandra* 035.

Fijałkowska i in. [32] wykazali, że ciepło spalania biomasy dziewięciu klonów wierzby miało również wąski przedział wartości tej cechy od 18,45 do 18,77  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$

Tabela 11

Wartość opałowa biomasy wierzby krzewiastej ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	$8,57 \pm 0,46^b$	$8,88 \pm 0,00^c$
<i>S. alba</i>	Duotur	$7,93 \pm 0,29^e$	$8,30 \pm 0,04^f$
<i>S. dasyclados</i>	155	$7,55 \pm 0,65^g$	$7,68 \pm 0,01^h$
<i>S. fragilis</i>	195	$7,98 \pm 0,29^e$	$8,89 \pm 0,02^c$
<i>S. pentandra</i>	035	$8,82 \pm 0,25^a$	$9,27 \pm 0,01^a$
<i>S. triandra</i>	198	$8,08 \pm 0,33^{de}$	$8,75 \pm 0,01^d$
<i>S. viminalis</i>	006	$8,11 \pm 0,23^{de}$	$8,34 \pm 0,06^{ef}$
	Sprint	$8,23 \pm 0,21^d$	$9,04 \pm 0,04^b$
	Start	$7,94 \pm 0,40^e$	$8,26 \pm 0,02^f$
	Kortur	$7,75 \pm 0,38^f$	$8,11 \pm 0,10^g$
	Oltur	$7,86 \pm 0,47^{ef}$	$8,12 \pm 0,07^g$
	Turbo	$7,98 \pm 0,44^e$	$8,70 \pm 0,04^d$
	Tur	$8,35 \pm 0,18^{cd}$	$9,22 \pm 0,03^a$
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	$8,41 \pm 0,12^c$	$8,38 \pm 0,04^e$
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	$7,91 \pm 0,27^e$	$8,69 \pm 0,04^d$
Średnio		$8,10 \pm 0,47$	$8,58 \pm 0,44$

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Wartość opałowa biomasy w obu badanych technologiach zawarta była w przedziale od 8,10 do 8,58  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (tab. 11). Najwyższą wartość opałową biomasy oznaczono u klonu *S. pentandra* zarówno w technologii I (8,82  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), jak i technologii II (9,27  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), a najniższą u klonu *S. dasyclados* 155, odpowiednio 7,55 i 7,68  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Wartość opałowa biomasy determinowana jest głównie jej wilgotnością, dlatego wzrastała ona wraz z wydłużaniem cyklu zbioru roślin wierzby i jednoczesnym spadkiem wilgotności (tab. 11), co potwierdzają inni autorzy [29, 33, 34].

Tabela 12

Zawartość węgla w biomase wierzby krzewiastej (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	52,75 ± 0,80 <sup>a</sup>	51,71 ± 0,14 <sup>ab</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	50,96 ± 1,28 <sup>bc</sup>	50,99 ± 0,29 <sup>c</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	51,25 ± 0,62 <sup>b</sup>	50,27 ± 0,07 <sup>de</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	50,25 ± 0,43 <sup>d</sup>	50,04 ± 0,20 <sup>e</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	51,47 ± 1,07 <sup>b</sup>	50,45 ± 0,28 <sup>d</sup>
<i>S. triandra</i>	198	50,87 ± 0,83 <sup>bc</sup>	51,50 ± 0,04 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	51,16 ± 1,24 <sup>b</sup>	49,99 ± 0,00 <sup>e</sup>
	Sprint	50,52 ± 0,81 <sup>c</sup>	50,81 ± 0,26 <sup>cd</sup>
	Start	50,63 ± 1,12 <sup>c</sup>	51,88 ± 0,00 <sup>a</sup>
	Kortur	50,46 ± 1,25 <sup>c</sup>	49,78 ± 0,35 <sup>ef</sup>
	Oltur	51,13 ± 0,58 <sup>b</sup>	50,90 ± 0,06 <sup>c</sup>
	Turbo	50,51 ± 1,03 <sup>c</sup>	51,40 ± 0,05 <sup>b</sup>
	Tur	50,13 ± 1,10 <sup>d</sup>	51,34 ± 0,19 <sup>b</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	51,51 ± 0,68 <sup>b</sup>	50,78 ± 0,13 <sup>cd</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	51,12 ± 1,23 <sup>b</sup>	50,71 ± 0,32 <sup>cd</sup>
Średnio		50,98 ± 1,13	50,84 ± 0,65

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Zawartość pierwiastkowego węgla w biomase wierzby była zbliżona w technologii I i II i wyniosła odpowiednio 50,98% i 50,84% (tab. 12).

Zawartość tego pierwiastka w biomase wierzby pozyskiwanej w cyklach jednorocznych (technologia I) mieściła się w przedziale od 50,13% do 52,75%, odpowiednio u odmiany Tur i klonu *S. acutifolia* 093. Natomiast w biomase pozyskiwanej w cyklach trzyletnich (technologia II) wahała się ona od 49,99% u klonu *S. viminalis* 006 do 51,88% u odmiany Start.

Relatywnie wysoka zawartość węgla oznaczonego w biomase wierzby pozyskiwanej w cyklach jednorocznych może być związana z dużym udziałem w niej kory (26,7%), u roślin dwuletnich oznaczono tylko 16,7% [28].

Tabela 13

Zawartość wodoru w biomase wierzby krzewiastej (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Baldy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	6,37 ± 0,04 <sup>a</sup>	6,76 ± 0,08 <sup>a</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	6,29 ± 0,04 <sup>b</sup>	6,27 ± 0,01 <sup>ef</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	6,21 ± 0,06 <sup>c</sup>	6,24 ± 0,02 <sup>f</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	6,16 ± 0,04 <sup>d</sup>	6,37 ± 0,01 <sup>d</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	6,23 ± 0,14 <sup>c</sup>	6,23 ± 0,02 <sup>f</sup>
<i>S. triandra</i>	198	6,23 ± 0,08 <sup>c</sup>	6,42 ± 0,05 <sup>bc</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	6,22 ± 0,11 <sup>c</sup>	6,28 ± 0,02 <sup>e</sup>
	Sprint	6,30 ± 0,08 <sup>b</sup>	6,47 ± 0,02 <sup>b</sup>
	Start	6,22 ± 0,06 <sup>c</sup>	6,14 ± 0,01 <sup>g</sup>
	Kortur	6,18 ± 0,08 <sup>d</sup>	6,35 ± 0,01 <sup>d</sup>
	Oltur	6,24 ± 0,13 <sup>c</sup>	6,27 ± 0,01 <sup>ef</sup>
	Turbo	6,24 ± 0,07 <sup>c</sup>	6,38 ± 0,01 <sup>cd</sup>
	Tur	6,22 ± 0,04 <sup>c</sup>	6,39 ± 0,10 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	6,27 ± 0,09 <sup>b</sup>	6,30 ± 0,06 <sup>de</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	6,32 ± 0,07 <sup>b</sup>	6,32 ± 0,09 <sup>de</sup>
Średnio		6,25 ± 0,09	6,35 ± 0,14

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Zawartość wodoru oznaczona w jednorocznej biomase wierzby krzewiastej była nieznacznie niższa niż u roślin zbieranych co 3 lata i wynosiła odpowiednio 6,25% i 6,35% (tab. 13). W biomase klonu *S. acutifolia* 093 oznaczono najwyższą zawartość wodoru 6,37% i 6,76%, odpowiednio w technologii I i II.

Tabela 14

Zawartość siarki w biomase wierzby krzewiastej (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Baldy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	0,036 ± 0,005 <sup>d</sup>	0,019 ± 0,001 <sup>gh</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	0,055 ± 0,012 <sup>a</sup>	0,025 ± 0,001 <sup>de</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	0,042 ± 0,006 <sup>e</sup>	0,014 ± 0,002 <sup>i</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	0,044 ± 0,004 <sup>bc</sup>	0,018 ± 0,001 <sup>h</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	0,054 ± 0,008 <sup>a</sup>	0,022 ± 0,002 <sup>ef</sup>
<i>S. triandra</i>	198	0,041 ± 0,002 <sup>e</sup>	0,016 ± 0,000 <sup>hi</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	0,043 ± 0,004 <sup>bc</sup>	0,037 ± 0,000 <sup>b</sup>
	Sprint	0,041 ± 0,007 <sup>e</sup>	0,017 ± 0,000 <sup>h</sup>
	Start	0,041 ± 0,002 <sup>e</sup>	0,020 ± 0,000 <sup>g</sup>
	Kortur	0,040 ± 0,004 <sup>c</sup>	0,048 ± 0,001 <sup>a</sup>
	Oltur	0,044 ± 0,008 <sup>bc</sup>	0,023 ± 0,000 <sup>e</sup>
	Turbo	0,049 ± 0,013 <sup>b</sup>	0,018 ± 0,001 <sup>h</sup>
	Tur	0,042 ± 0,007 <sup>e</sup>	0,026 ± 0,001 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	0,048 ± 0,006 <sup>b</sup>	0,024 ± 0,002 <sup>e</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	0,049 ± 0,014 <sup>b</sup>	0,032 ± 0,002 <sup>c</sup>
Średnio		0,045 ± 0,009	0,024 ± 0,009

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22].

Zawartość siarki w biomase wierzby pozyskanej w jednorocznym cyklu była prawie 2-krotnie wyższa niż w biomase zbieranej w cyklu trzyletnim, (tab. 14). Zawartość tego składnika w technologii I u piętnastu badanych genotypów zawarta była w przedziale od 0,036% do 0,055%, odpowiednio u klonu *S. acutifolia* 093 i odmiany Duotur. Natomiast w technologii II jej zawartość wahała się od 0,014% u klonu *S. dasyclados* 155 do 0,048% u odmiany Kortur.



Tabela 15

Zawartość azotu w biomase wierzby krzewiastej (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Baldy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	0,76 ± 0,06 <sup>bc</sup>	0,44 ± 0,01 <sup>b</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	0,77 ± 0,06 <sup>b</sup>	0,611 ± 0,01 <sup>a</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	0,68 ± 0,04 <sup>f</sup>	0,31 ± 0,00 <sup>f</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	0,71 ± 0,09 <sup>e</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>d</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	0,77 ± 0,07 <sup>b</sup>	0,29 ± 0,01 <sup>g</sup>
<i>S. triandra</i>	198	0,65 ± 0,04 <sup>h</sup>	0,29 ± 0,00 <sup>g</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	0,71 ± 0,04 <sup>e</sup>	0,32 ± 0,00 <sup>e</sup>
	Sprint	0,64 ± 0,07 <sup>h</sup>	0,33 ± 0,01 <sup>e</sup>
	Start	0,66 ± 0,04 <sup>g</sup>	0,36 ± 0,00 <sup>d</sup>
	Kortur	0,60 ± 0,02 <sup>i</sup>	0,28 ± 0,01 <sup>g</sup>
	Oltur	0,78 ± 0,11 <sup>a</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>d</sup>
	Turbo	0,78 ± 0,14 <sup>a</sup>	0,35 ± 0,00 <sup>d</sup>
	Tur	0,63 ± 0,05 <sup>i</sup>	0,28 ± 0,01 <sup>g</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	0,75 ± 0,06 <sup>c</sup>	0,40 ± 0,00 <sup>c</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	0,73 ± 0,05 <sup>d</sup>	0,35 ± 0,01 <sup>d</sup>
Średnio		0,71 ± 0,09	0,35 ± 0,08

± odchylenie standardowe; a, b, c... grupy jednorodne

Źródło: [22]

Zawartość azotu w biomase wierzby pozyskanej w jednorocznym cyklu była 2-krotnie wyższa niż w biomase zbieranej w cyklu trzyletnim, odpowiednio 0,71% i 0,35% (tab. 15). Zawartość tego pierwiastka najniższa była u odmiany Tur w obu technologiach. Azot i siarka są pierwiastkami niepożądanymi w biomase, ponieważ podczas jej spalania powodują emisję szkodliwych gazów do atmosfery [35].

Tabela 16

Zawartość chloru w biomase wierzby (% s.m.)

Gatunek	Odmiana Klon UWM	Technologia	
		I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku (średnio z lat 2009–2011)	II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata (dane z 2011 r.)
<i>S. acutifolia</i>	093	0,016 ± 0,002 <sup>b</sup>	0,006 ± 0,001 <sup>e</sup>
<i>S. alba</i>	Duotur	0,016 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,014 ± 0,001 <sup>b</sup>
<i>S. dasyclados</i>	155	0,019 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,011 ± 0,001 <sup>c</sup>
<i>S. fragilis</i>	195	0,017 ± 0,003 <sup>b</sup>	0,014 ± 0,003 <sup>b</sup>
<i>S. pentandra</i>	035	0,011 ± 0,002 <sup>d</sup>	0,014 ± 0,001 <sup>b</sup>
<i>S. triandra</i>	198	0,018 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,009 ± 0,001 <sup>d</sup>
<i>S. viminalis</i>	006	0,015 ± 0,002 <sup>c</sup>	0,012 ± 0,001 <sup>c</sup>
	Sprint	0,017 ± 0,005 <sup>b</sup>	0,007 ± 0,001 <sup>de</sup>
	Start	0,016 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,005 ± 0,001 <sup>e</sup>
	Kortur	0,017 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,010 ± 0,001 <sup>cd</sup>
	Oltur	0,014 ± 0,003 <sup>c</sup>	0,017 ± 0,002 <sup>a</sup>
	Turbo	0,015 ± 0,004 <sup>c</sup>	0,014 ± 0,003 <sup>b</sup>
	Tur	0,020 ± 0,003 <sup>a</sup>	0,013 ± 0,001 <sup>bc</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. amygdalina</i>	054	0,016 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,004 ± 0,001 <sup>e</sup>
<i>S. viminalis</i> x <i>S. purpurea</i>	Monotur	0,016 ± 0,004 <sup>b</sup>	0,011 ± 0,001 <sup>c</sup>
Średnio		0,016 ± 0,004	0,011 ± 0,004

Źródło: [22]

Zawartość chloru oznaczona w biomase wierzby była niska i zbliżona w obu technologiach produkcji (tab. 16).

Chlor jest pierwiastkiem niepożądanym w biomase, ponieważ podczas jej spalania powoduje korozję części urządzeń metalowych paleniska i kotła [35].

#### 4.1.3. Opłacalność uprawy

Koszty bezpośrednie założenia i prowadzenia plantacji wierzby w pierwszym roku wegetacji wyniosły 12127,9 i 7741,3 zł · ha<sup>-1</sup>, odpowiednio w technologii I i II. Wyższe koszty założenia plantacji przeznaczonej do zbioru w rotacjach jednorocznych wynikały głównie z zastosowania wyższej gęstości sadzenia zrzesów (48 tys. sztuk na ha). W tym wariantcie stanowiły one 60% kosztów całkowitych. Na drugim miejscu znajdowały się koszty związane z sadzeniem zrzesów, a na kolejnym koszty związane z likwidacją plantacji. Plantację

Tabela 17

Koszty bezpośrednie założenia i prowadzenia plantacji wierzby krzewiastej w pierwszym roku uprawy

Wyszczególnienie	Technologia			
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku		II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata	
	zł · ha <sup>-1</sup>	%	zł · ha <sup>-1</sup>	%
Oprysk (glifosat)	47,3	0,4	47,3	0,6
Talerzowanie (2x)	181,5	1,5	181,5	2,3
Orka zimowa	238,9	2,0	238,9	3,1
Bronowanie (2x)	194,1	1,6	194,1	2,5
Sadzonki	7272,8	60,0	3750,0	48,4
Wytyczanie znaków do sadzenia	121,7	1,0	121,7	1,6
Sadzenie ręczne	1802,9	14,9	939,0	12,1
Oprysk (herbicyd doglebowy)	47,3	0,4	47,3	0,6
Koszt herbicydu	272,0	2,2	272,0	3,5
Pielenie (2x)	269,7	2,2	269,7	3,5
Koszt likwidacji plantacji	1100,0	9,1	1100,0	14,2
Podatek rolny	100,0	0,8	100,0	1,3
Zbiór roślin po 1 roku wegetacji	347,4	2,9	374,4	4,5
Transport w obrębie pola	132,3	1,1	132,3	1,7
Razem	12127,9	100,0	7741,3	100,0
Na rok użytkowania plantacji 1/19	638,3		407,4	

Źródło: [36]

do zbioru w rotacjach trzyletnich założono w niższym zagęszczeniu (25 tys. sztuk na ha), a koszt zakupu zrzesów stanowił 48,4% kosztów całkowitych. W przeliczeniu na rok użytkowania plantacji koszty założenia plantacji wierzby zawierały się w przedziale od 407 do 638 zł · ha<sup>-1</sup> rok<sup>-1</sup>, odpowiednio w trzyletnim i jednorocznym cyklu zbioru (tab. 17).

Podstawowym mankamentem uprawy wierzby krzewiastej jest to, że koszty obciążają inwestora jednorazowo przy założeniu plantacji. Środki poniesione na założenie plantacji są niejako zamrożone i obniżają płynność finansową danego gospodarstwa, co jest jedną z poważnych przyczyn braku zainteresowania rolników zakładaniem tego rodzaju upraw.

Tabela 18

Koszty bezpośrednie produkcji zrębków wierzby w zależności od wysokości plonu i technologii produkcji

Wyszczególnienie	Technologia					
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku			II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata		
	plon średni	plon max.	plon min.	plon średni	plon max.	plon min.
Koszt bezpośredni założenia plantacji	638,3	638,3	638,3	1222,3	1222,3	1222,3
Siła robocza	225,9	282,8	81,7	438,5	851,4	125,2
Ciągniki	615,0	778,4	200,3	727,0	1371,0	233,0
Maszyny	654,0	846,8	164,8	3694,5	8087,1	361,8
Środki ochrony roślin	182,0	182,0	182,0	182,0	182,0	182,0
Nawozy NPK	452,5	452,5	452,5	452,5	452,5	452,3
Podatek rolny	100,0	100,0	100,0	300,0	300,0	300,0
Razem (zł · ha <sup>-1</sup> )	2867,6	3280,8	1819,6	7013,7	12466,3	2876,9
Razem (zł · ha <sup>-1</sup> · rok <sup>-1</sup> )	2867,6	3280,8	1819,6	2337,9	4155,4	959,0

Źródło: [36]

Koszty bezpośrednie produkcji zrębków wierzby zbieranej w jednorocznym cyklu zbioru wynosiły średnio 2867,6 zł · ha<sup>-1</sup> (tab. 18). Przy plonie maksymalnym (odmiana Start plonowała najwyżej w tej technologii) były one wyższe o ponad 412 zł · ha<sup>-1</sup>, natomiast przy plonie minimalnym (uzyskanym u klonu UWM 093) o ponad 1 tys. zł · ha<sup>-1</sup> niższe. W tym ostatnim wariancie w strukturze kosztów produkcji dominowały koszty związane z założeniem plantacji 35,1%. Ich udział zmniejszył się do 22,3 i 19,5%, odpowiednio przy plonie średnim i maksymalnym. Wzrastał natomiast udział kosztów związanych z wykorzystaniem maszyn i ciągników.

Średnie koszty produkcji biomasy w technologii I w jednorocznym cyklu zbioru były równoważone plonem 17,7 t · ha<sup>-1</sup> świeżej biomasy. Koszty produkcji zrębków wierzby w technologii II w trzyletnim cyklu zbioru wynosiły średnio 7013,7 zł · ha<sup>-1</sup>, co w przeliczeniu na rok użytkowania plantacji stanowiło 2337,9 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>. Przy plonie maksymalnym (uzyskanym u klonu UWM 006) były one ponad 4-krotnie wyższe niż przy minimalnym (u klonu UWM 093). Średnie koszty produkcji biomasy w trzyletnim cyklu zbioru były równoważone plonem 40,9 t · ha<sup>-1</sup> s.m. W strukturze kosztów produkcji zrębków w trzyletnim cyklu zbioru przy plonie maksymalnym i średnim dominowały zdecydowanie koszty maszyn (głównie zbiór kombajnem), odpowiednio prawie 65% i 53%.

Tak więc z jednej strony wyższy plon daje potencjalnie możliwość uzyskania wyższych przychodów, ale z drugiej strony generuje wyższe koszty produkcji. Dlatego też obniżenia kosztów produkcji biomasy wierzby należałoby głównie poszukiwać w optymalizacji jej zbioru w cyklu trzyletnim.

Tharakan i in. [30] podają, że wzrost plonów o 18% może zredukować koszty dostarczania biomasy do końcowego odbiorcy o 13%. Z kolei zbiór i transport stanowią od 39% do 60% kosztów produkcji biomasy wierzby. W związku z tym zwiększenie wydajności i efektywności zbioru o 25% może zmniejszyć koszt dostarczania biomasy wierzby w przybliżeniu o 7,5 USD t<sup>-1</sup>. Również Rosenqvist i in. [37] uważają, że poprzez wybór optymalnych technologii w całym łańcuchu produkcji można obniżyć koszty produkcji zrębków wierzbowych. Cytowani autorzy podają, że w uprawach wierzby krzewiastej na podstawie obecnej wiedzy i technologii można obniżyć koszty produkcji średnio o około 10%. Natomiast wraz ze wzrostem wiedzy i poprawy technologii uprawy *Salix* L. koszty produkcji mogą być obniżone średnio o około 35%. Przy czym największych redukcji kosztów upatruje się kolejno: na etapie zbioru biomasy, zarządzania plantacją, zakładania plantacji oraz regulacji zachwaszczenia. Również przez stosowanie wstępnie oczyszczonych ścieków z oczyszczalni komunalnych oraz osadów ściekowych do nawożenia plantacji wierzby można zwiększyć efektywność ekonomiczną produkcji biomasy wierzbowej. W systemie tym rolnicy mogą liczyć na dofinansowanie za przyjęcie osadów na własną plantację, a zawarte w nich związki biogenne zastępują nawozy mineralne, a więc obniżają koszty produkcji biomasy wierzby. W systemie tym rośliny wierzby rosnące na plantacji stanowią swoisty filtr biologiczny pobierają związki biogenne z osadów ściekowych i umożliwiają ich utylizację [38, 39, 40].

Wartość zrębków wierzbowych pozyskiwanych w technologii I w jednorocznym cyklu zbioru (przy cenie 20 zł · GJ<sup>-1</sup>) wynosiła 162 zł t<sup>-1</sup> i była niższa o 9,6 zł · t<sup>-1</sup> niż w technologii II w cyklu trzyletnim ze względu na niższą ich wartość opałową (tab. 19). W związku z tym wartość uzyskanego plonu wynosiła średnio 4061,3 zł · ha<sup>-1</sup> w jednorocznym i 4197,9 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> w trzyletnim cyklu zbioru. Natomiast przy plonach maksymalnych w obu technologiach wartości tej cechy wynosiła odpowiednio 5287,7 zł · ha<sup>-1</sup> i 9228,1 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>.

W pierwszym etapie obliczono wartość nadwyżki bezpośredniej loco plantacja. Wykazano, że w technologii I w jednorocznym cyklu zbioru przy plonie średnim wynosiła ona 1193,7 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>, a technologii II w trzyletnim cyklu zbioru była ona o 666 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> wyższa. Z kolei przy plonie maksymalnym wartość tej cechy w cyklu trzyletnim (5072,7 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>) była o ponad 3 tys. zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> wyższa niż w cyklu jednorocznym. Natomiast produkcja zrębków wierzby przy plonach minimalnych była nieopłacalna zarówno w jednorocznym jak i trzyletnim cyklu zbioru.

Transport biomasy do zakładu konwersji na odległość 50 km skutkowało oczywiście obniżeniem wartości nadwyżki bezpośredniej średnio

Tabela 19

Nadwyżka bezpośrednia produkcji wierzby loco plantacja w zależności od wysokości plonu i technologii produkcji przy transporcie na odległość 50 km i cenie 20 zł · GJ<sup>-1</sup>

Wyszczególnienie	Technologia					
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku			II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata		
	plon średni	plon max.	plon min.	plon średni	plon max.	plon min.
Plon świeżej biomasy (t · ha <sup>-1</sup> )	25,1	32,6	5,9	73,4	161,3	6,7
Bezpośredni koszt produkcji (zł · ha <sup>-1</sup> )	2867,6	3280,8	1819,6	7013,7	12466,3	2876,9
Bezpośredni koszt produkcji (zł · t <sup>-1</sup> )	114,4	100,5	310,0	95,6	77,3	431,3
Cena zrębków (zł · t <sup>-1</sup> )	162,0	162,0	162,0	171,6	171,6	171,6
Wartość plonu (zł · ha <sup>-1</sup> )	4061,3	5287,7	950,9	12593,7	27684,2	1144,6
Nadwyżka bezpośrednia loco plantacja (zł · ha <sup>-1</sup> )	1193,7	2006,9	-868,7	5580,0	15218,0	1732,3
Nadwyżka bezpośrednia loco plantacja (zł · ha <sup>-1</sup> · rok <sup>-1</sup> )	1193,7	2006,9	-868,7	1860,0	5072,7	-577,4
Nadw. bezpośrednia loco zakład konwersji (zł · ha <sup>-1</sup> )	717,4	1386,7	-980,2	4185,6	12152,7	-1859,0
Nadw. bezpośrednia loco zakład konwersji (zł · ha <sup>-1</sup> · rok <sup>-1</sup> )	717,4	1386,7	-980,2	1395,2	4050,9	-619,7

Źródło: [36]

o 717,4 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> i 1395,2 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>, odpowiednio w jednorocznym i trzyletnim cyklu zbioru. Bardzo wysoką wartość nadwyżki bezpośredniej loco zakład konwersji (4050, zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>) uzyskano przy maksymalnym plonie w technologii II w trzyletnim cyklu zbioru.

We wcześniejszych badaniach również najwyższą wartość nadwyżki bezpośredniej uzyskano przy zbiorze roślin wierzby co trzy lata i wyjściowym zagęszczeniu 24 tys. roślin ha<sup>-1</sup> [34]. Rosenqvist i Dawson [37] wykazali, że w Północnej Irlandii uprawa wierzby opłacalna była przy minimalnym plonie 18,4 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> s.m. i przy cenie 20 £ t<sup>-1</sup>. Natomiast Styles i in. [41] podają, że wartość nadwyżki bezpośredniej z uprawy wierzby krzewiastej przy plonie na poziomie 10 t s.m. ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> oraz cenie za zrębki w wysokości 70–130 euro t<sup>-1</sup> s.m. zawierała się w przedziale od 211 do 270 euro ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>. Z kolei Grzybek i Gradziuk [42] podają, że przy jednoetapowym zbiorze biomasy *Salix* L. produkcja była opłacalna przy cenie na poziomie 32,5 euro t<sup>-1</sup> · s.m. Wartość nadwyżki bezpośredniej w cytowanych badaniach wynosiła około 352 euro ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>. Natomiast Melin i Larsson [43] podają, że zysk z uprawy wierzby krzewiastej w Szwecji przy plonie na poziomie 9 t s.m. · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> wynosi około 271 euro ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>.

#### 4.1.4. Energochłonność uprawy wierzby krzewiastej

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na założenie i prowadzenie 1 hektara plantacji wierzby w pierwszym roku wegetacji były wyższe w technologii I SDB Bałdy z obsadą 48 tys. szt. ha<sup>-1</sup> zbiór co roku niż w technologii II SDB Łęczany – obsada roślin 25 tys. szt. ha<sup>-1</sup>, zbiór co trzy lata, wyniosły one odpowiednio 34 442 i 23 461 MJ · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> (tab. 20). Nakłady te przeliczone na rok użytkowania plantacji wyniosły odpowiednio 1813 i 1235 MJ · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>. Niższe o około 32% nakłady materiałowo-energetyczne w technologii II SDB Łęczany w porównaniu do technologii I SDB Bałdy wynikały głównie ze zmniejszenia obsady roślin wierzby z 48 tys. szt. ha<sup>-1</sup> do 25 tys. szt. ha<sup>-1</sup>. Podobną zależność wykazano również we wcześniejszej pracy [34].

Tabela 20  
Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na założenie i prowadzenie plantacji wierzby w pierwszym roku uprawy

Wyszczególnienie	Technologia			
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co roku		II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. ha <sup>-1</sup> zbiór co 3 lata	
	MJ · ha <sup>-1</sup>	%	MJ · ha <sup>-1</sup>	%
Oprysk (glifosat)	704	2,0	704	3,0
Talerzowanie (2x)	1159	3,4	1159	4,9
Orka zimowa	1459	4,2	1459	6,2
Bronowanie (2x)	1091	3,2	1091	4,6
Wytyczanie znaków do sadzenia	580	1,7	580	2,5
Sadzonki i sadzenie ręczne	13487	39,2	6984	29,8
Herbicyd i oprysk (herbicyd doglebowy)	854	2,5	854	3,6
Pielenie (2x)	1170	3,4	1170	5,0
Likwidacja plantacji	12303	35,7	7825	33,4
Zbiór roślin po 1 roku wegetacji	975	2,8	975	4,2
Transport w obrębie pola	661	1,9	661	2,8
Razem	34442	100,0	23461	100,0
Na rok użytkowania plantacji 1/19	1813	–	1235	–

Źródło: [44]

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków w obu badanych technologiach były zróżnicowane i zależały od wysokości plonu świeżej biomasy wierzby krzewiastej (tab. 21). W technologii I SDB Bałdy mieściły się w przedziale od 12 292 MJ · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> przy plonie

biomasy minimalnym do  $18\ 017\ \text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  przy maksymalnym plonie biomasy. W technologii II SDB Łężany były one znacznie niższe.

W strukturze strumieni energii w technologii I SDB Bałdy – zbiór roślin co roku – dominowały nakłady związane z użyciem nawozów NPK (48,7% – plon średni) i bezpośrednich nośników energii (31,8% – plon średni). Natomiast w technologii II SDB Łężany – zbiór co trzy lata – dominowały nakłady na bezpośrednie nośniki energii (46,7% – plon średni) i na nawożenie NPK (26,8% – plon średni). Dalsze pozycje nakładów w strukturze strumieni energii w obu technologiach produkcji zrębków wierzby to środki trwałe (ciągniki i maszyny) oraz praca ludzi.

Tabela 21

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję zrębków wierzby krzewiastej ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Wyszczególnienie	Technologia					
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co roku			II SDB Łężany obsada roślin 25 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co 3-lata		
	plon średni	plon max.	plon min.	plon średni	plon max.	plon min.
Plon świeżej biomasy ( $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	25,1	32,6	5,9	73,4	161,3	6,7
Praca ludzi	736	857	428	1382	2260	714
Środki trwałe (ciągniki, maszyny)	1171	1424	530	4758	9586	1095
Bezpośrednie nośniki energii	5218	6463	2060	13929	27487	3640
Surowce roślinne (sadzonki)	601	601	601	1067	1067	1067
Środki ochrony roślin	692	692	692	692	692	692
Nawozy	7980	7980	7980	7980	7980	7980
Razem nakłady energii	16398	18017	12292	29808	49072	15188
Razem ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ )	16398	18017	12292	9936	16357	5063

Źródło: [44]

Wartość energetyczna plonu biomasy wierzby była wysoce istotnie zróżnicowana i zawarta w przedziale od  $19,1$  do  $461,4\ \text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  (tab. 22). Wartość średnia tej cechy w obu badanych technologiach była zbliżona i wyniosła odpowiednio  $203,1$  i  $209,9\ \text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Wartość energetyczna plonu maksymalnego biomasy w technologii I SDB Bałdy była o około 1,8-krotnie niższa niż w technologii II. Bardzo wysoki plon energii w technologii II ( $461,4\ \text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  – plon maksymalny) uzyskano w wyniku wprowadzenia do doświadczenia nowego klonu wierzby *S. viminalis* UWM 006. Badania potwierdziły przydatność tego klonu do uprawy w technologii II SDB Łężany w zagęszczeniu  $25\ \text{tys. szt. roślin} \cdot \text{ha}^{-1}$  i przy zbiorze pędów w cyklu trzyletnim.



Kwaśniewski [45] podaje, że wartość energetyczna plonu biomasy wierzby pozyskanej w rotacji trzyletniej wyniosła  $226 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Borjesson i Brenndes [39] informują, że w Szwecji na plantacjach polowych wartość energetyczna plonu może wynosić około  $200 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Natomiast Stolarski [34] w doświadczeniu z wierzbą prowadzonym na madzie próchnicznej ciężkiej w optymalnych warunkach agrotechnicznych uzyskał wartość energetyczną plonu biomasy wierzby zbieranej co trzy lata w przedziale od 188 do  $349 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

Tabela 22

Efektywność energetyczna produkcji zrębków wierzby krzewiastej

Wyszczególnienie	Technologia					
	I SDB Bałdy obsada roślin 48 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co roku			II SDB Łęczany obsada roślin 25 tys. szt. $\text{ha}^{-1}$ zbiór co 3 lata		
	plon średni	plon max.	plon min.	plon średni	plon max.	plon min.
Plon świeżej biomasy ( $\text{t} \cdot \text{ha} \cdot \text{rok}$ )	25,1	32,6	5,9	24,5	53,4	2,2
Nakłady energii ( $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ )	16,4	18,0	12,3	9,9	16,3	5,1
Wartość energetyczna plonu ( $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ )	203,1	264,4	47,5	209,9	461,4	19,1
Zysk energii ( $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ )	186,7	246,4	35,3	200,0	445,0	14,0
Energochłonność produkcji zrębków ( $\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	654	552	2094	406,0	304,0	2277
Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków*	12,4	14,7	3,9	21,2	27,3	2,8

Źródło: [44]

\* Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wyrażony ilorazem wartości energetycznej plonu i nakładów energii

Zysk energii w technologii I SDB Bałdy przy zbiorze roślin co roku najwyższy był ( $246,4 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ) przy maksymalnym plonie. Był on o około  $199 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$  niższy niż uzyskany przy maksymalnym plonie w technologii II – zbiór roślin co trzy lata (tab. 22).

Wskaźnik efektywności energetycznej produkcji zrębków wierzby najwyższy był przy maksymalnym plonie (27,3) w technologii II SDB był on prawie 2-krotnie wyższy niż uzyskany przy maksymalnym plonie (14,7) w technologii I. Niskie wartości wskaźnika efektywności energetycznej w przedziale od 2,8 do 3,9 uzyskano przy plonach minimalnych odpowiednio w technologii II i I.

Stolarski [34] podaje, że wskaźnik efektywności energetycznej produkcji biomasy wierzby w trzyletniej rotacji zbioru roślin był zróżnicowany i zawarty

w przedziale od 13,6 do 22,1 w zależności od gęstości sadzenia zrzesów. Natomiast Kwaśniewski [45] wykazał, że wskaźnik ten przy zbiorze wierzby z plantacji trzyletnich był bardzo zróżnicowany i dla analizowanych obiektów zawierał się przedziale 15,4–40,7.

Heller i in. [46], Matthews [47], Pisker [48] podają, że istotny wpływ na wartość wskaźnika efektywności energetycznej mają: sposób przygotowania i rodzaj stanowiska glebowego, gęstość nasadzeń zrzesów na plantacji, wysokość nawożenia mineralnego, zużycie środków ochrony roślin, zabiegi agrotechniczne, a w szczególności sposób zbioru wierzby.

## 4.2. Produkcyjność i analiza ekonomiczno-energetyczna produkcji ślazuca pensylwańskiego

### 4.2.1. Plon i elementy jego struktury

Wschody roślin ślazuca z wysianych nasion były bardzo liczne. Do czasu pierwszego zbioru nastąpiły jednak znaczne ubytki roślin (tab. 23). Po wysadzeniu sadzonek korzeniowych obsada przyjętych roślin na tych obiektach wynosiła ponad 90% zakładanej. Również rozsada przyjęła się bardzo dobrze. W drugim roku wegetacji przy zbyt gęstej obsadzie roślin wyrosłych z nasion na skutek konkurencji nastąpiły dalsze znaczne ubytki roślin. Natomiast w obiektach z wysadzoną rozsadą obsada roślin nie uległa znaczącym zmianom.

Tabela 23

Obsada roślin ślazuca pensylwańskiego przed zbiorem (tys. szt · ha<sup>-1</sup>)

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	79,6±20,9	188,1±25,8	18,1±1,7	56,3±5,8	19,8±0,4	59,6 ±0,6	70,2±59,2
2010	29,5±6,1	49,5±7,6	18,0±4,4	33,8±7,4	19,6±0,5	56,3±4,7	34,5±15,5
2011	28,8±5,9	41,1±6,3	17,4±2,9	31,0±3,5	19,3±0,6	50,6±6,8	31,4±12,4
Średnio	46,0±27,3	92,9±70,6	17,9±3,1	40,4±12,8	19,5±0,5	55,5±5,9	45,4±39,9
(2011/2009) · 100%	36,2	21,8	95,7	55,0	97,5	84,9	45,8
NIR <sub>0,05</sub>	a – 5,11 b – 3,62 a × b – 8,87						

Źródło: [49]

W kolejnym, czyli trzecim roku użytkowania doświadczenia, ubytki roślin były już znacznie mniejsze. Największa obsada roślin była na poletkach obsadzonych 60 tys. szt. rozsady, gdzie przetrwało prawie 85% wysadzonych roślin oraz na poletkach z siewem 4,5 kg nasion, na których pozostało tylko około 16% wzeszłych i niespełna 22% roślin rosnących w pierwszym roku użytkowanego doświadczenia (tab. 23).

W przypadku zbyt gęstych wschodów szybko nastąpiła samoregulacja obsady przez wypadanie części roślin, na co wskazują inni autorzy [12].

W pierwszym roku wegetacji rośliny wyrosłe z nasion i rozsady wytwarzały po jednym pędzie, natomiast niektóre rośliny wyrosłe z sadzonek korzeniowych nieco więcej, bo średnio po 1,3–1,4 pędów (tab. 24).

W drugim roku użytkowania doświadczenia rośliny wytworzyły średnio po 7,6 pędów. Ciekawe, że więcej pędów miały rośliny z rozmnożeń wegetatywnych niż wyrosłych z nasion. Cecha ta powtórzyła się w kolejnym roku, przy czym wszystkie rośliny wytworzyły średnio o prawie 2 pędy więcej niż rok wcześniej. Natomiast najwięcej pędów wyrastało u rzadziej rosnących roślin rozmnażanych z rozsady (12,4) oraz z sadzonek korzeniowych (10,9).

Tabela 24

Liczba pędów na roślinie ślazuca pensylwańskiego

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	1,0±0,1	1,0±0,1	1,4±0,2	1,3±0,2	1,0±0,1	1,0±0,1	1,1±0,2
2010	6,8±1,0	6,9±0,9	8,0±1,0	7,1±1,0	9,5±1,1	7,1±0,8	7,6±1,3
2011	7,9±1,1	7,1±1,0	10,9±0,6	9,6±0,9	12,4±0,4	8,3±1,2	9,5±2,1
Średnio	5,2±3,2	5,0±3,0	6,8±4,1	6,0±3,6	7,6±4,9	5,5±3,3	6,0±3,8
NIR <sub>0,05</sub>	a – 0,4 b – 0,3 a × b – 0,7						

Źródło: [49]

Rośliny z rozmnożeń wegetatywnych, a w szczególności z sadzonek korzeniowych w pierwszym i drugim roku wegetacji były znacznie wyższe i miały grubsze łodygi niż wyrosłe z nasion. W trzecim roku użytkowania wartości tych cech wyrównały się (tab. 25 i 26).

Tabela 25

Wysokość roślin ślazuca pensylwańskiego przed jego zbiorem (cm)

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	101±12	117±18	161 +11	178±10	143±10	151±11	142±29
2010	313±19	308±15	314±10	333±9	304±6	306±8	313±15
2011	309±8	305±7	306±4	311±7	308±9	304±10	307±8
Średnio	241±102	243±92	260±78	274±71	251±79	253±75	254±82
NIR <sub>0,05</sub>	a – 6 b – 4 a × b – 11						

Źródło: [49]

Tabela 26

Średnica pędów ślazuca pensylwańskiego (cm)

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	7,6±1,0	7,2±0,9	12,7±1,1	11,4±1,2	9,5±10,8	8,5±1,0	9,5±2,2
2010	12,6±1,1	12,4±9	14,2±1,2	14,5±0,5	13,9±1,1	12,4±1,1	13,3±1,3
2011	13,3±0,6	13,9±0,7	13,4±0,2	14,2±0,8	13,5±0,5	13,6±0,6	13,7±0,6
Średnio	11,3±2,9	11,2±3,0	13,4±1,1	13,4±1,6	12,3±2,2	11,5±2,4	12,2±2,4
NIR <sub>0,05</sub>	a – 0,5 b – 0,4 a × b – 0,9						

Źródło: [49]

Wilgotność biomasy zbieranych roślin zależała głównie od warunków meteorologicznych w okresie poprzedzającym zbiór w danym roku badań. Wyższa była w pierwszym i trzecim roku, średnio około 26 i 25%, niższa zaś w drugim roku badań i wynosiła niespełna 22% (tab. 27). Relatywnie niska wilgotność zbieranych roślin jest jedną z zalet ślazuca.

Tabela 27

Wilgotność pędów ślazuwca pensylwańskiego w okresie jego zbioru

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	27,97 ± 1,17	26,32 ± 0,95	25,69 ± 0,78	25,90 ± 1,19	25,78 ± 0,99	25,69 ± 0,72	26,23 ± 1,24
2010	22,08 ± 1,16	21,78 ± 1,05	22,0 ± 0,60	22,53 ± 0,60	21,78 ± 0,96	21,51 ± 1,08	21,95 ± 1,00
2011	24,69 ± 1,08	26,42 ± 0,82	24,66 ± 0,11	24,96 ± 0,96	25,00 ± 0,53	24,55 ± 0,53	25,05 ± 0,95
Średnio	24,91 ± 2,69	24,84 ± 2,39	24,12 ± 1,68	24,46 ± 1,78	24,19 ± 1,95	23,92 ± 1,96	24,41 ± 2,10
NIR <sub>0,05</sub>	a - 0,52 b - 0,67 a × b - 0,90						

Źródło: [49]

W pierwszym roku zebrano średnio zaledwie 1,8 tony biomasy, w drugim 11,4, a w trzecim około 16,5 t · ha<sup>-1</sup> (tab. 28). W przeliczeniu na suchą masę było to odpowiednio 1,33, 8,92 i 13,37 t · ha<sup>-1</sup>. Plon suchej masy z pierwszego zbioru zgodnie z przewidywaniem był niski (tab. 29). Najniższy był w obiektach z siewem 1,5 kg nasion, a przy rozmnażaniu wegetatywnym 2- do ponad 4-krotnie wyższy. W drugim roku plony były już bardziej wyrównane i zawierały się w przedziale od 7,6 do 10,3 t s.m. ha<sup>-1</sup>. Najniższy plon ponownie uzyskano z roślin wyrosłych z wysiewu 1,5 kg · ha<sup>-1</sup> nasion, ale istotnie wyższe plony zebrano tylko z poletek obsadzonych 60 tys. rozsady i sadzonek korzeniowych. W trzecim roku badań istotnie najwyższe plony suchej masy (14,46 t · ha<sup>-1</sup>) zebrano z poletek obsadzonych 60 tys. rozsady ha<sup>-1</sup>. Plony z pozostałych poletek były zbliżone i nie różnicowane istotnie. Najwyższe łączne plony z trzech lat uzyskano z wysadzenia 60 tys. ha<sup>-1</sup> sadzonek korzeniowych i rozsady.

Tabela 28

Plon świeżej masy ślazuwca pensylwańskiego (t · ha<sup>-1</sup>)

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	0,72 ± 0,43	1,24 ± 0,65	1,52 ± 0,42	2,93 ± 0,71	1,88 ± 0,38	2,49 ± 0,57	1,80 ± 0,91
2010	9,75 ± 2,93	11,17 ± 3,05	10,21 ± 2,21	13,29 ± 1,55	11,42 ± 1,95	12,79 ± 3,38	11,44 ± 2,27
2011	14,96 ± 2,91	16,33 ± 3,34	14,79 ± 2,73	18,00 ± 2,04	15,71 ± 2,55	19,17 ± 3,27	16,49 ± 3,13
Średnio	8,48 ± 6,43	9,58 ± 6,78	8,84 ± 5,95	11,41 ± 11,41	9,67 ± 6,17	11,48 ± 7,49	9,91 ± 6,59
NIR <sub>0,05</sub>	a - 1,27 b - 0,89 a × b - 2,19						

Źródło: [49]

Wyniki własne uzyskane w pierwszych trzech latach użytkowania ślazuca potwierdzają więc częściowo dane Borkowskiej i Styka [6], że o około 10% wyższe plony uzyskać można z rozmnożeń wegetatywnych niż z nasion. Zmniejszające się z każdym kolejnym rokiem wegetacji ślazuca różnice w plonach w zależności od materiału siewnego, przy jego kilkunastoletnim użytkowaniu mogą być zupełnie zniwelowane. Brakuje danych dotyczących dynamiki plonowania ze wzrostem wieku plantacji. Powszechny pogląd o użytkowaniu plantacji przez nawet 20 lat wymaga potwierdzenia w badaniach.

W badaniach prowadzonych przez innych autorów plon biomasy zależał od obsady roślin i warunków glebowych. Na glebie ciężkiej i średniej (kompleksy 8 i 4) przy obsadzie 10 tys. szt · ha<sup>-1</sup> roślin średni plon wynosił około 9 t · ha<sup>-1</sup>, natomiast na glebie lekkiej (kompleks 5), gdzie obsada roślin wynosiła 20 tys. szt · ha<sup>-1</sup>, plony suchej masy wynosiły średnio 15,4 t · ha<sup>-1</sup> [10]. Borkowska i Styk [6] podają, że na glebie mineralnej kompleksu pszennego dobrego plony wahały się od 13,8 do 17,8 t suchej masy z ha.

Tabela 29

Plon suchej masy ślazuca pensylwańskiego (t · ha<sup>-1</sup>)

Rok (b)	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						Średnio
	nasiona		sadzunki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
2009	0,52±0,31	0,91±0,48	1,13±0,32	2,17±0,52	1,39±0,28	1,85±0,43	1,33±0,68
2010	7,60±2,32	8,72±2,35	7,96±1,73	10,30±1,18	8,93±1,49	10,02±2,61	8,92±2,15
2011	11,28±2,27	12,03±2,53	11,14±2,06	11,53±1,59	11,78±1,90	14,46±2,45	13,37±2,38
Średnio	6,47±4,90	7,22±5,13	6,75±4,52	8,66±5,00	7,37±4,67	8,78±5,69	7,54±4,99
NIR <sub>0,05</sub>	a – 0,97 b – 0,68 a × b – 1,68						

Źródło: [49]

#### 4.2.2. Wartość opałow a i skład elementarny biomasy

Biomasa ślazuca pensylwańskiego w okresie jego zbioru zawierała średnio około 2,5% popiołu (tab. 30). Nieco większą zawartość popiołu oznaczono w pędach roślin wyrosłych z nasion (2,65%) niż z rozmnożeń wegetatywnych (2,30–2,53%). W innych badaniach własnych [50] zawartość popiołu w biomacie ślazuca wynosiła średnio 3,36% i była istotnie wyższa niż u wierzby 2,29% i miskanta 2,39%.

Ciepło spalania wynosiło średnio  $19,03 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m., a wartość opałowa  $13,98 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Wartość energetyczna plonu obliczona średnio z drugiego i trzeciego roku użytkowania doświadczenia była wysoka, wynosiła od 172 do ponad  $225 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$  i determinowana była głównie przez plon suchej masy. Dla porównania wartość energetyczna plonu wierzby w badaniach Stolarskiego [34] wahała się w przedziale od około 100 do  $400 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Zawartość węgla wyniosła średnio 47,3%, wodoru 6,26% oraz siarki 0,037%.

Tabela 30  
Charakterystyka biomasy ślazuwa pensylwańskiego jako biopaliwa (średnie z lat 2010–2011)

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)						NIR <sub>0,05</sub>
	nasiona		sadzunki korzeniowe		rozsada		
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	
Zawartość popiołu (%)	2,65	2,65	2,47	2,30	2,53	2,35	0,171
Ciepło spalania (MJ · kg <sup>-1</sup> s.m.)	19,00	19,07	19,02	19,08	18,97	19,08	<i>n.i.</i>
Wartość opałowa (MJ · kg <sup>-1</sup> )	13,98	13,85	14,01	13,97	13,96	14,12	0,168
Wartość energetyczna plonu (GJ · ha <sup>-1</sup> )	172,4	190,5	175,1	218,6	189,4	225,5	
Zwartyość węgla (% s.m.)	47,17	47,02	47,65	47,45	47,21	47,32	0,256
Zawartość wodoru (% s.m.)	6,26	6,27	6,20	6,28	6,24	6,25	<i>n.i.</i>
Zawartość siarki (% s.m.)	0,041	0,40	0,036	0,034	0,39	0,033	0,006

Źródło: [49]

### 4.2.3. Opłacalność uprawy

Koszty bezpośrednie założenia oraz prowadzenia plantacji ślazuwa pensylwańskiego w pierwszym roku wegetacji były bardzo zróżnicowane i wahały się od 4842,5 zł w obiekcie z wysiewem  $1,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  nasion do 33841,4 zł · ha<sup>-1</sup> po wysadzeniu 60 tys. szt. · ha<sup>-1</sup> rozsady. W przeliczeniu na jeden rok użytkowania plantacji wyniosły odpowiednio od około 255 do 1781 zł (tab. 31). O wysokości powyższych kosztów decydował więc głównie koszt materiału siewnego, wynoszący odpowiednio od ponad 37 do prawie 89% wszystkich kosztów (tab. 32). Ważną pozycją okazały się koszty likwidacji plantacji, których często nie uwzględnia się w kosztach. Wyniosły one w badaniach własnych 978 zł · ha<sup>-1</sup> i w strukturze kosztów ogólnych stanowiły od 2,9 do ponad 20%.

Kalkulacje dotyczące kosztów zakładania plantacji roślin energetycznych są bardzo rozbieżne nawet w obrębie tego samego gatunku i wynikają z relacji cen w danym roku, różnego doboru maszyn, cen materiału siewnego i innych założeń. Według danych Kusia i Matyki [10] koszt założenia plantacji ślazuca przy wysiewie nasion wynosił  $9319 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ , zaś przy ręcznym sadzeniu sadzonek wzrósł do  $11\,127 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Dla porównania przeciętny koszt założenia 1 ha plantacji wierzby krzewiastej ci sami autorzy wyliczyli na  $9060 \text{ zł}$ , a miskanta na  $23075 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Tabela 31

Koszty bezpośrednie założenia oraz prowadzenia plantacji ślazuca pensylwańskiego w pierwszym roku wegetacji w zależności od sposobu rozmnażania ( $\text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)					
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada	
	1,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	4,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt} \cdot \text{ha}^{-1}$
Oprysk (glifosat)	47,3	47,3	47,3	47,3	47,3	47,3
Podorywka	92,9	92,9	92,9	92,9	92,9	92,9
Orka zimowa	238,9	238,9	238,9	238,9	238,919	238,9
Bronowanie (2x)	194,	194,1	194,1	194,1	4,1	194,1
Koszt zakupu materiału siewnego	1800	5400	5000	15000	1000	30000
Siew/sadzenie	83,5	83,5	294,1	882,4	294,1	882,4
Oprysk (2x) (herbicyd)						
Wysiew nawozów	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Pielenie (2x)	269,7	269,7	269,7	269,7	269,7	269,7
Koszt środków ochrony roślin	378,8	378,8	378,8	378,8	378,8	378,8
Koszt nawozów NPK	297,8	297,8	297,8	297,8	297,8	297,8
Podatek rolny	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Likwidacja plantacji	978,0	978,0	978,0	978,0	978,0	978,0
Zbiór roślin	173,7	173,7	173,7	173,7	173,7	173,7
Transport w obrębie pola	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1	33,1
Razem	4842,5	8442,5	8253,1	18841,4	13253,1	33841,4
Na rok użytkowania plantacji 1/19 $\Sigma$	254,9	444,3	434,4	991,7	697,5	1781,1

Źródło: [51]



Tabela 32

Struktura kosztów bezpośrednich założenia oraz prowadzenia plantacji ślazuca pensylwańskiego w pierwszym roku wegetacji w zależności od sposobu rozmnażania (%)

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)					
	nasiona		sadzionki korzeniowe		rozsada	
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>
Oprysk (glifosat)	1,0	0,6	0,6	0,3	0,4	0,1
Podorywka	1,9	1,1	1,1	0,5	0,7	0,3
Orka zimowa	4,9	2,8	2,9	1,3	1,8	0,7
Bronowanie (2x)	4,0	2,3	2,4	1,0	1,5	0,6
Koszt zakupu mat. siewnego	37,2	64,0	60,6	79,6	75,5	88,6
Siew/sadzenie	1,7	1,0	3,6	4,7	2,2	2,6
Oprysk (2x) (herbicyd)	2,0	1,1	1,1	0,5	0,7	0,3
Wysiew nawozów	1,2	0,7	0,7	0,3	0,5	0,2
Pielenie (2x)	5,6	3,2	3,3	1,4	2,0	0,8
Koszt środków ochrony roślin	7,8	4,5	4,6	2,0	2,9	1,1
Koszt nawozów NPK	6,1	3,5	3,6	1,6	2,2	0,9
Podatek rolny	2,1	1,2	1,2	0,5	0,8	0,3
Likwidacja plantacji	20,2	11,6	11,9	5,2	7,4	2,9
Zbiór roślin	3,6	2,1	2,1	0,9	1,3	0,5
Transport w obrębie pola	0,7	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1
Razem	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Źródło: [51]

Koszty bezpośrednio produkcji zrębków zależały głównie od kosztów założenia plantacji, a tylko w niewielkim stopniu modyfikowane były przez siłę roboczą, ciągniki i maszyny, których koszt związany był z wysokością zebranego plonu biomasy. Koszty produkcji zrębków loco plantacja wahały się od około 1734 do 3460 zł · ha<sup>-1</sup> (tab. 33), w tym koszty założenia plantacji stanowiły od prawie 15 do ponad 51% wszystkich kosztów. Kuś i Matyka [10] koszt produkcji ślazuca wyliczyli na 2705 zł · ha<sup>-1</sup> dla wierzby 1723, a dla miskanta 2945 zł · ha<sup>-1</sup>, co w przeliczeniu na 1 tonę suchej biomasy wynosiło odpowiednio 301, 191 i 245 zł. W badaniach własnych dotyczących produkcji biomasy wierzby różnymi technologiami koszty produkcji zrębków wynosiły od 2338 do 2868 zł · ha<sup>-1</sup> oraz od 96 do 114 zł · t<sup>-1</sup>.

Tabela 33

Koszty bezpośrednie produkcji zrębków ślazuca pensylwańskiego loco plantacja (zł · ha<sup>-1</sup>)

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia (a)					
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada	
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt · ha <sup>-1</sup>
Koszt bezpośredni założenia plantacji	254,9	444,3	434,4	991,7	697,5	1781,1
Siła robocza	122,7	133,3	124,0	147,6	132,0	150,1
Ciągniki	345,3	376,0	349,0	416,9	372,0	424,1
Maszyny	359,7	395,9	364,02	444,2	391,2	452,7
Środki ochrony roślin	253,8	253,8	53,8	253,8	253,8	253,8
Nawozy NPK	297,8	297,8	297,8	297,8	297,8	297,8
Podatek rolny	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Razem (zł · ha <sup>-1</sup> )	1734,1	2001,1	1922,9	2651,9	2244,2	3459,6

Źródło: [51]

Koszt produkcji jednej tony zrębków ślazuca w badaniach własnych zależał od rodzaju materiału siewnego oraz zebranego plonu biomasy. Najniższy był w obiekcie z wysiewem 1,5 kg nasion/ha (140,6 zł), najwyższy zaś po wysadzeniu 60 tys. rozsady/ha (216,5 zł). Cena zrębków zależała od ich wartości energetycznej i wahała się od 277,1 do 282, zł · t<sup>-1</sup>. Plon równoważący koszty produkcji zrębków w przypadku użycia 1,5 kg nasion jako materiału siewnego wynosił 6,2 t · ha<sup>-1</sup>, zaś po wysadzeniu 60 tys. szt. ha<sup>-1</sup> rozsady musiałby być dwukrotnie wyższy (tab. 33). Według Kusia i Matyki [52] opłacalność ślazuca następuje przy plonach ponad 11 t · ha<sup>-1</sup> s.m. i korzystnych cenach za biomase.

Wartość zebranego plonu biomasy ślazuca zależała oczywiście od wysokości plonu i wynosiła od około 3449 do prawie 4513 zł · ha<sup>-1</sup>. Pomimo najwyższej wartości plonu uzyskanego w obiekcie z wysadzeniem 60 tys. rozsady ha<sup>-1</sup> obliczona nadwyżka bezpośrednia loco plantacja była tam najniższa i wynosiła 1053 zł · ha<sup>-1</sup>. Około 1,5-krotnie wyższą nadwyżkę bezpośrednią uzyskano w obiektach z wysadzeniem 20 tys. na 1 ha sadzonek korzeniowych i rozsady. Ponad 1700 zł nadwyżki uzyskano w obiektach z wysadzeniem 60 tys. sadzonek korzeniowych oraz po wysiewie 1,5 kg · ha<sup>-1</sup> nasion. Najwyższa wartość nadwyżki bezpośredniej loco plantacja wynosiła 1809 zł i wystąpiła w obiekcie z wysiewem 4,5 kg nasion · ha<sup>-1</sup>.

Nadwyżka bezpośrednia loco zakład konwersji była bardzo zróżnicowana przez rodzaj materiału siewnego. Najniższa wynosząca 274 zł była pomimo najwyższej wartości zebranego plonu w obiekcie z sadzeniem 60 tys. szt · ha<sup>-1</sup> rozsady. Ponad 3–3,5-krotnie wyższa była w pozostałych obiektach obsadzo-

nych materiałem wegetatywnym. Najwyższa zaś, wynosząca około 1113 i 1139 zł · ha<sup>-1</sup>, wystąpiła w obiektach przy wysiewie zarówno 1,5, jak i 4,5 kg nasion ha<sup>-1</sup> (tab. 34). Uzyskane wartości nadwyżki bezpośredniej loco plantacja, a także loco zakład konwersji wskazują na porównywalne efekty ekonomiczne produkcji biomasy ślazuowca z wierzbą. W równolegle prowadzonych badaniach z wierzbą w zależności od technologii produkcji nadwyżka bezpośrednia loco plantacja wynosiła od około 1194 do 1860 zł, a loco zakład konwersji od 717 do 1395 zł · ha<sup>-1</sup>.

Tabela 34  
Nadwyżka bezpośrednia produkcji ślazuowca pensylwańskiego loco plantacja przy transporcie na odległość 50 km i cenie 20 zł · GJ<sup>-1</sup>

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia					
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada	
	1,5 kg · ha <sup>-1</sup>	4,5 kg · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt. · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt. · ha <sup>-1</sup>	20 tys. szt. · ha <sup>-1</sup>	60 tys. szt. · ha <sup>-1</sup>
Plon świeżej biomasy (t · ha <sup>-1</sup> )	12,3	13,8	12,5	15,6	13,6	16,0
Bezpośredni koszt produkcji (zł · ha <sup>-1</sup> )	1734,1	2001,1	1922,9	2651,9	2244,2	3459,6
Bezpośredni koszt produkcji (zł · t <sup>-1</sup> )	140,6	145,5	153,8	169,5	165,4	216,5
Cena zrębków (zł · t <sup>-1</sup> )	279,7	277,1	280,2	279,4	279,2	282,4
Plon równoważący koszty produkcji (t · ha <sup>-1</sup> )	6,2	7,2	6,9	9,5	8,0	12,3
Wartość uzyskanego plonu (zł · ha <sup>-1</sup> )	3448,7	3810,1	3502,5	4371,2	3787,3	4512,8
Nadwyżka bezpośrednia loco plantacja (zł · ha <sup>-1</sup> )	1714,6	1809,0	1579,6	1719,3	1543,1	1053,1
Nadwyżka bezpośrednia loco zakład konwersji (zł · ha <sup>-1</sup> )	1113,5	1138,7	970,2	956,6	881,8	274,1

Źródło: [51]

#### 4.2.4. Energochłonność uprawy ślazuowca pensylwańskiego

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na produkcję biomasy ślazuowca loco plantacja najniższe (9129 i 9448 MJ · ha<sup>-1</sup>) wyliczono przy zakładaniu plantacji z wysiewu nasion (1,5 oraz 4,5 kg · ha). Wyższe nakłady (11719–18873 MJ · ha<sup>-1</sup>) obliczono w technologiach, w których zastosowano wegetatywny materiał siewny i rozsadę, zwłaszcza wysadzanę w zagęszczeniu 60 tys. szt · ha<sup>-1</sup> (tab. 35).

Tabela 35

Skumulowane nakłady materiałowo-energetyczne poniesione na technologii produkcji zrębków ślazuca loco plantacja ( $\text{MJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ )

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia					
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada	
	1,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	4,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$
Praca ludzi	292	315	315	407	332	412
Środki trwale (ciągniki, maszyny)	670	718	680	797	715	809
Bezpośrednie nośniki energii	2761	2995	2801	3358	2976	3414
Surowce roślinne (sadzonki)	305	321	2823	7876	3244	9139
Środki ochrony roślin	450	450	450	450	450	450
Nawozy	4650	4650	4650	4650	4650	4650
Razem nakłady energii	9129	9448	11719	17538	12367	18873

Źródło: badania własne

Uwzględniając wartość energetyczną uzyskanego plonu, która wynosiła  $172,4\text{--}225,6 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ , obliczony współczynnik efektywności energetycznej produkcji biomasy ślazuca wynosił od 12,0 do 20,2. Wyższy wskaźnik efektywności otrzymano w obiektach o niższych nakładach energetycznych, a więc przy zakładaniu plantacji z wysiewu nasion, najniższy zaś pomimo najwyższego plonu biomasy w obiekcie z sadzeniem rozsady w obsadzie 60 tys.  $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$  (tab. 36).

Tabela 36

Efektywność energetyczna produkcji zrębków ślazuca pensylwańskiego loco plantacja

Wyszczególnienie	Rodzaj materiału siewnego i ilość wysiewu/wysadzenia					
	nasiona		sadzonki korzeniowe		rozsada	
	1,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	4,5 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	20 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$	60 tys. $\text{szt.} \cdot \text{ha}^{-1}$
Nakład energii ( $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	9,1	9,4	11,7	17,5	12,4	18,9
Wartość energetyczna plonu $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$	172,4	190,5	175,1	218,6	189,4	225,6
Zysk energii ( $\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	163,3	181,1	163,4	201,0	177,0	206,8
Energochłonność jednostkowa produkcji zrębków ( $\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$ )	740,4	687,1	937,5	1121,0	911,7	1181,1
Współczynnik efektywności energetycznej produkcji zrębków ślazuca	18,9	20,2	14,9	12,5	15,3	12,0

Źródło: badania własne

Analiza ekonomiczna wykazała, że ważnym elementem jest wybór materiału siewnego lub sadzeniowego przy zakładaniu plantacji ślazuca. Badania powyższe jednoznacznie wskazują, iż w technologii z wysiewem  $4,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  uszlachetnionych nasion ślazuca pensylwańskiego można uzyskać najwyższy współczynnik efektywności, co potwierdza jej praktyczne stosowanie.

### 4.3. Przydatność biomasy wierzby krzewiastej i ślazuca pensylwańskiego do zgazowania w termogeneratorze

Bilans masowy procesu zgazowania i spalania biomasy przedstawiono w tab. 37.

Tabela 37

Bilans masowy procesu zgazowania i spalania biomasy wierzby

Rodzaj danych	$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$
Biomasa (paliwo) podawana do reaktora	91,0
Powietrze podawane do reaktora	135,5
Produkt zgazowania (gaz)	224,9
Powietrze rozcieńczające gaz	26,3
Rozcieńczony gaz	251,2
Powietrze do palnika	670,8
Spaliny gorące	922,0
Woda zimna	18,5
Woda gorąca	18,5
Spaliny zimne	922,0
Popiół (żużel)	1,6

Źródło: badania własne

Zrębki wierzby i powietrze były podawane do reaktora zgazowania odpowiednio w ilości  $91,0$  i  $135,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Otrzymano  $224,9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  gazu, który składał się z mieszaniny wodoru, tlenu węgla, metanu, węglowodorów C1-C3 oraz pary wodnej i smół. Części nieorganiczne paliwa w postaci popiołu wytwarzane były w ilości  $1,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Produkt zgazowania ulegał rozcieńczeniu powietrzem w ilości  $26,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Rozcieńczony gaz spalał się w palniku w obecności dużej ilości powietrza ( $648,1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ), co generowało temperaturę ponad  $1000^\circ\text{C}$ . Gorące spaliny w ilości  $922,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  w komorze kotła chłodzone były wodą obiegową ( $18,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ) i po schłodzeniu kierowane do komina.

Bilans energii w procesie zgazowania i spalania biomasy wierzby zamieszczono w tab. 38

Energia chemiczna paliwa wynosiła 404,7 kWh, a energia odebrana 318,0 kWh, co stanowiło sprawność 78,6%. Straty energii w procesie zgazowania i spalania to odpowiednio 12,2% i 9,2%. Energia chemiczna gazu wynosiła 205,6 kWh, a smół i pyłu odpowiednio 86,3 i 52,2 kWh.

Tabela 38

Bilans energii w procesie zgazowania i spalania biomasy wierzby

Rodzaj danych	kWh	%
Energia chemiczna paliwa	404,7	100
Energia chemiczna gazu	205,6	50,8
Energia chemiczna smół	86,3	21,3
Energia chemiczna pyłu	52,2	12,9
Energia cieplna gazu i zanieczyszczeń	11,1	2,7
Energia odebrana	318,0	78,6
Straty energii w procesie zgazowania	49,6	12,2
Straty energii w procesie spalania	37,2	9,2

Źródło: badania własne

W składzie gazu suchego uzyskanego ze zgazowania biomasy dominującymi nośnikami był tlenek węgla oraz wodór (tab. 39).

Tabela 39

Skład gazu ze zgazowania biomasy (% objętościowy)

Skład molowy gazu suchego	Rodzaj paliwa	
	zrębki słazowca	zrębki wierzby
H <sub>2</sub>	6,48	8,43
CO	20,23	29,94
CH <sub>4</sub>	1,35	0,90
CO <sub>2</sub>	3,38	3,14
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0,05	0,04
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,07	0,05
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,03	0,02
N <sub>2</sub>	57,65	56,39
O <sub>2</sub>	6,91	1,09

Źródło: badania własne

Oznaczono także w niewielkich ilościach: metan, eten, etan, propan. Ponadto w skład gazu wchodził azot, dwutlenek węgla oraz tlen.

Wartość opałowa gazu suchego nie rozcieńczonego powietrzem wynosiła 4384 kJ · kg<sup>-1</sup> paliwa. Frakcja smoły, pyłu i pary wodnej stanowiły odpowiednio: 0,15, 0,1, 0,34 kg · kg<sup>-1</sup> paliwa (tab. 40).

Tabela 40

Wydajność frakcji gazu ze zgazowania biomasy wierzby oraz wartość opałowa gazu

Wydajność frakcji gazu	Jednostka
Gaz suchy	2,14 kg · kg <sup>-1</sup> paliwa
Smoły	0,15 kg · kg <sup>-1</sup> paliwa
Pył	0,1 kg · kg <sup>-1</sup> paliwa
Para wodna	0,34 kg · kg <sup>-1</sup> paliwa
Wartość opałowa gazu suchego	4384 kJ · kg <sup>-1</sup> gazu

Źródło: badania własne

Zawartość smół i pyłu wynosiła odpowiednio 69,3 i 48,2 g · kg<sup>-1</sup> gazu. Porównanie wartości stężeń tlenu i dwutlenku węgla w spalinach zmierzonych i bilansowych przedstawiono w tabeli 41.

Tabela 41

Zawartość tlenu i dwutlenku węgla w spalinach ze zgazowania wierzby

Stężenie O <sub>2</sub> , % objętościowy		Stężenie CO <sub>2</sub> , % objętościowy	
zmierzone	bilansowe	zmierzone	bilansowe
5,8–8,0	7,75	10,5–12,5	12,76

Źródło: badania własne

Tabela 42

Koszty wytworzenia 1 GJ energii cieplnej ze zgazowania zrębków wierzby

Wyszczególnienie	Jednostka	Wariant 1 (330 dni pracy w roku)	Wariant 2 (231 dni pracy w roku)
Koszty paliwa (zrębki)	zł	172972,8	121081,0
Koszty transportu paliwa	zł	749,5	524,7
Energia elektryczna i woda	zł	19870,0	13930,0
Płace i narzuty	zł	8450,0	4875,0
Amortyzacja	zł	42000,0	42000,0
Remonty i konserwacje	zł	42000,0	42000,0
Razem koszty bezpośrednie	zł	286042,3	224410,6
Koszty pośrednie (ogólnozakładowe)	zł	18502,1	15420,5
Ogółem koszty	zł	304544,5	239831,2
Ilość wytworzonego ciepła	GJ	7255,6	5078,9
Jednostkowy koszt wytworzenia ciepła	zł · GJ <sup>-1</sup>	42,0	47,2

Źródło: badania własne

Obliczone z bilansu pierwiastkowego wartości stężeń tlenu i dwutlenku węgla w spalinach nie odbiegały znacząco od zakresów wartości mierzonych.

Koszty wytworzenia 1 GJ energii cieplej ze zgazowania zrębków wierzby w gazogeneratorze o mocy 500 kW przedstawiono w tab. 42. W wariantcie I, w którym założono, że instalacja będzie pracowała przez 330 dni w roku, koszt wytworzenia 1 GJ energii cieplej wyniósł 42 zł. Natomiast w wariantcie II, w którym założono, że instalacja będzie pracować tylko w okresie grzewczym (231 dni pracy w roku), koszty te były wyższe i wyniosły 47,2 zł · GJ<sup>-1</sup>.

## 5. Podsumowanie i wnioski

Zdecydowanie najwyższe plony biomasy wierzby wydał nowy klon UWM 006 *S. viminalis*, uprawiany w wyjściowej obsadzie 25 tys. szt. ha<sup>-1</sup> i zbierany w cyklu trzyletnim. Pędy tego klonu były najwyższe i miały największą średnicę. O ponad 30% niżej plonowała uprawiana powyższą technologią odmiana Duotur, a pozostałe odmiany jeszcze niżej. W technologii uprawy z wysadzeniem 48 tys. szt. · ha<sup>-1</sup> i zbiorem co rok wyróżniły się odmiany Start i Kortur oraz nowy klon *S. fragilis* 195, które plonowały ponad 40% niżej od klonu UWM 006 uprawianego technologią z obsadą 25 tys. roślin · ha<sup>-1</sup> i ze zbiorem co 3 lata.

Biomasa wierzby pozyskana w technologii II w trzyletnim cyklu zbioru charakteryzowała się wyższą wartością opałową oraz niższą zawartością popiołu, azotu i siarki niż biomasa uzyskana w technologii I w jednorocznym cyklu.

Koszty bezpośrednie założenia oraz prowadzenia plantacji wierzby krzewiastych w technologii I przy zagęszczeniu 48 tys. sztuk roślin, ha<sup>-1</sup> wynosiły średnio około 12 128 zł · ha<sup>-1</sup>, a w technologii II przy gęstości 25 tys. sztuk roślin ha<sup>-1</sup> były znacznie niższe (średnio 7741 zł · ha<sup>-1</sup>). Niższe koszty wynikały głównie z mniejszej obsady i kosztu zakupu zręzków.

Koszty bezpośrednie produkcji zrębków wierzby wysadzonej w zagęszczeniu 48 tys. sztuk ha<sup>-1</sup> i przy jej corocznym zbiorze wyniosły średnio około 2868 zł · ha<sup>-1</sup> lub 114 zł · t<sup>-1</sup>, natomiast przy zagęszczeniu wierzby 25 tys. sztuk ha<sup>-1</sup> i przy jej trzyletnim cyklu zbioru były wyraźnie niższe (2338 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> i 95,6 zł · t<sup>-1</sup>).

Koszty produkcji biomasy wierzby w jednorocznym cyklu zbioru były równoważone średnim plonem świeżej biomasy na poziomie 17,7 t · ha<sup>-1</sup>, a w cyklu trzyletnim przy plonie 40,9 t · ha<sup>-1</sup> – 13,6 t · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup>.

Uprawa wierzby w technologii I w dużym zagęszczeniu (48 tys. szt./ha) i przy zbiorze co roku przy plonie na poziomie 25,1 ton biomasy pozwala uzyskać nadwyżkę bezpośrednią około 1194 zł · ha<sup>-1</sup> · rok<sup>-1</sup> loco plantacja, natomiast w przypadku technologii II jej uprawy z wysadzeniem



25 tys. zrzechów  $\text{ha}^{-1}$  i zbiorem biomasy co 3 lata nadwyżka ta wyniosła  $1860 \text{ zł} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

Najwyższą wartość energetyczną plonu wierzby ( $461 \text{ GJ} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ ) i najwyższy wskaźnik efektywności energetycznej uprawy i produkcji biomasy (27) oraz najniższą energochłonność produkcji zrębków ( $0,3 \text{ GJt}^{-1}$ ) uzyskano przy uprawie klonu UWM 006 *Salix viminalis* w technologii II przy obsadzie roślin 25 tys. szt.  $\text{ha}^{-1}$  i zbiorze wierzby w cyklu trzyletnim.

Plony biomasy ślazuwca pensylwańskiego w pierwszym roku uprawy były niskie, wyraźnie wzrosły w drugim i trzecim roku użytkowania doświadczenia. Wyższy łączny plon biomasy z trzech lat uzyskano w obiektach z wysadzeniem 60 tys. szt.  $\cdot \text{ha}^{-1}$  rozsady i sadzonek korzeniowych w porównaniu do pozostałych obiektów.

Biomasa ślazuwca pensylwańskiego charakteryzowała się wysoką wartością energetyczną. Ciepło spalania wynosiło około  $19 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m., zawierało wysoką zawartość węgla i wodoru, a relatywnie niską zawartość siarki, chloru i azotu.

Koszty bezpośrednie założenia i prowadzenia plantacji ślazuwca pensylwańskiego były wysokie. W obiekcie z wysiewem  $1,5 \text{ kg nasion} \cdot \text{ha}$  wyniosły 4842 zł, zaś przy zastosowaniu 60 tys. szt. rozsady osiągnęły kwotę aż 33841 zł  $\cdot \text{ha}^{-1}$ . Koszty materiału siewnego stanowiły od 37 do 89% wszystkich kosztów.

Koszt produkcji zrębków ślazuwca pensylwańskiego loco plantacja wynosił od około 1734 do 3460 zł  $\cdot \text{ha}^{-1}$ , w tym od 15 do 51% to koszty założenia plantacji.

Pomimo najwyższej wartości plonu uzyskanego po wysadzeniu 60 tys.  $\cdot \text{ha}$  rozsady ślazuwca pensylwańskiego, nadwyżka bezpośrednia loco plantacja oraz loco zakład konwersji były tam najniższe (1059 i 274 zł). Najwyższą nadwyżkę uzyskano w obiektach z wysiewem  $4,5 \text{ kg nasion} \cdot \text{ha}^{-1}$  (1809 i 1139 zł).

Aby zrównoważyć koszty produkcji biomasy ślazuwca pensylwańskiego, należałoby uzyskać plon od  $6,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (przy wysiewie  $1,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  nasion) do  $12,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (przy wysadzeniu 60 tys. rozsady na ha).

Biomasa wierzby była w pełni przydatna do konwersji termochemicznej w gazogeneratorze. Proces gazyfikacji przebiegał prawidłowo. Wynikowa wydajność dla paliwa wierzby wynosiła 91,0 kg zrębków na godzinę, a uzyskana moc wynosiła 318 kW.

Układ dozowania paliwa w badanej instalacji wymaga biomasy dobrze rozdrobnionej przy zastosowaniu odpowiedniego efektywnego rębaka.

Wytworzony gaz niskokaloryczny z biomasy wierzby w mieszaninie z powietrzem spalano w palniku w temperaturze około  $1000^\circ\text{C}$  i ciepło spalin odbierano w kotle wodnym i rozprowadzano w systemie centralnego ogrzewania (CO, CWU). Energia cieplna odebrana stanowiła ponad 78,6% energii chemicznej na wejściu procesu.

Koszt 1 GJ energii cieplnej wytworzonej w instalacji wynosił w okresie grzewczym (231 dni pracy w roku)  $47,2 \text{ zł} \cdot \text{GJ}^{-1}$ , natomiast w okresie pracy instalacji 330 dni w roku koszt ten wyniósł  $42,0 \text{ zł} \cdot \text{GJ}^{-1}$ .

Powyższe podsumowanie pozwala na sformułowanie syntetycznych wniosków.

1. Optymalna technologia produkcji biomasy wierzby powinna uwzględniać użycie klonu UWM 006 *S. viminalis* o najwyższym potencjale produkcyjnym, wysadzanie w obsadzie 25 tys. szt. na hektar w systemie pasowym i zbiór biomasy w cyklu trzyletnim. Aspekty rolnicze, ekonomiczne i energetyczne wskazują na wybór tych elementów do zastosowań praktycznych.

2. Wybór materiału siewnego przy zakładaniu plantacji ślazuca pensylwańskiego jest elementem decydującym o plonowaniu i wynikach ekonomicznych produkcji biomasy i zrębków. Wysoki plon biomasy oraz najwyższą nadwyżkę bezpośrednią można uzyskać z wysiewu  $4,5 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  uszlachetnionych nasion, co rekomenduje do zakładania tą metodą plantacji w praktyce.

3. Wytworzony gaz z drewna wierzby w systemach rozproszonych może być alternatywą dla gazu ziemnego do wytwarzania ciepła niskotemperaturowego lub pary technologicznej. Natomiast w perspektywie po jego oczyszczeniu może zasilać wysokotemperaturowe ceramiczne ogniwo paliwowe (SOFC).

## 6. Literatura

1. Argus G.W. *Infrageneric classification of Salix (Salicaceae) in the New World. Systematic Botany Monographs*. American Society of Plant Taxonomists, 52: 1–121.
2. Tomanek J. *Botanika leśna*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa 1994: 449.
3. Stolarski M., Wróblewska H., Cichy W., Szczukowski S., Tworkowski J. *Skład chemiczny oraz wartość opałowa drewna wierzby krzewiastej pozyskanego z gruntów ornych*. *Drewno*, 2005, 48 (174): 5–16.
4. Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Kwiatkowski J., Krzyżaniak M., Łajszner W., Graban Ł. *Wieloletnie rośliny energetyczne*. Oficyna Wydawnicza MULTICO. Warszawa 2012: 156.
5. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Klasa A. *Productivity of seven clones of willow coppice in annual and quadrennial cutting cycles*. *Biomass and Bioenergy*, 2008 (32): 1227–1234.
6. Borkowska H., Styk B. *Ślazuca pensylwański – cenny gatunek energetyczny*. *Czysta Energia*, 2003 (9): 12–13.
7. Borkowska H., Styk B. *Ślazuca pensylwański (Sida hermaphrodita Rusby). Uprawa i wykorzystanie*. Wydawnictwo AR. Lublin 2006: 67.
8. Borkowska H., Styk B. *Stymulacja procesu kiełkowania nasion gatunku Sida hermaphrodita Rusby działaniem kwasu i statycznymi obciążeniami mechanicznymi*. Materiały konferencyjne „Uszlachetnianie materiałów nasiennych”. PAN/ART. Olsztyn 1994: 259–263.
9. Grzesik M., Romanowska-Duda B. *Technologia hydrokondycjonowania nasion ślazuca pensylwańskiego (Sida hermaphrodita) w aspekcie zmian klimatycznych*. W: *Produkcja biomasy – wybrane problemy*. Red. A. Skrobaccki. Wyd. SGGW. Warszawa 2009: 63–69.
10. Kuś J., Matyka M. *Plonowanie wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne w różnych warunkach siedliskowych*. W: *Produkcja biomasy – wybrane problemy*. Red. A. Skrobaccki. Wyd. SGGW. Warszawa 2009: 101–120.

11. Kalembasa S., Wiśniewska B. *Wpływ azotu na plon słazowca pensylwańskiego (Sida hermaphrodita Rusby) oraz zawartość w niej makroelementów*. Acta Agrophysica, 2006, 8 (1): 127–138.
12. Borkowska H., Wardzińska K. *Wpływ ilości wysiewu i terminów zbioru na zróżnicowanie plonów biomasy słazowca pensylwańskiego*. Annales UMCS. Sec. E, 1999, 54 (4): 31–35.
13. Szyszak J., Piekarski W., Krzaczek P., Borkowska H. *Ocena wartości energetycznych słazowca pensylwańskiego dla różnych grubości pędów rośliny*. Inżynieria Rolnicza, 2006 (6): 311–318.
14. Budzyński W., Szczukowski S., Tworkowski J. *Wybrane problemy z zakresu produkcji roślinnej na cele energetyczne*. W: *I Kongres Nauk Rolniczych Nauka – Praktyce „Przyszłość sektora rolno-spożywczego i obszarów wiejskich”*. Puławy 2009: 77–88.
15. Szyszak-Bargłowicz J., Piekarski W. *Wartość opałowa biomasy łodyg słazowca pensylwańskiego w zależności od wilgotności*. Inżynieria Rolnicza, 2009, 8 (117): 223–230.
16. Muzalewski A. *Koszty eksploatacji maszyn*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy Falenty. Warszawa 2010: 56.
17. Anuszewski R. *Metoda oceny energochłonności produktów rolniczych*. Zagadnienia Ekonomiki Rolnej, 1987 (4): 16–26.
18. Szeptycki A., Wójcicki Z. *Postęp technologiczny i nakłady energetyczne w rolnictwie do 2020 r.* IBMER. Warszawa 2003: 242.
19. Wójcicki Z. *Metodyczne problemy badania energochłonności produkcji rolniczej*. Problemy Inżynierii Rolniczej, 2005 (1): 5–12.
20. Wójcicki Z. *Poszanowanie energii i środowiska w rolnictwie i na obszarach wiejskich*. IBMER. Warszawa 2007: 124.
21. Normy PKN-CEN/TS 15439:2007 (U) CEN/TS 15439:2006 (E). *Biomass gasification – Tar and particles in product gases – Sampling and analysis*. Polski Komitet Normalizacyjny. Warszawa 2007.
22. Krzyżaniak M., Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J. *Productivity of new willow clones cultivated for energy and industrial purposes*. Biomass and Bioenergy, 2014 (w druku).
23. Adegbi H.G., Volk T.A., White E.H., Abrahamson L.P., Briggs R.D., Bickelhaupt D.H. *Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State*. Biomass and Bioenergy, 2001 (20): 399–411.
24. Kopp R.F., Abrahamson L.P., White E.H., Burns K.F., Nowak C.A. *Cutting cycle and spacing effects on biomass production by a willow clone in New York*. Biomass and Bioenergy, 1997, 12 (5): 313–319.
25. Faber A., Kuś J. *Rośliny energetyczne dla różnych siedlisk*. Wieś Jutra. 2007, 8–9 (109–110): 11–12.
26. MacPherson G. *Home-grown energy from short rotation coppice*. Farming Press North America, 1995: 214.
27. Labrecque M., Teodorescu T.I. *High biomass yield achieved by Salix clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada*. Biomass and Bioenergy, 2003 (25): 135–146.
28. Wilkinson J.M., Evans E.J., Bilsborrow P.E., Wright C., Hewison W.O., Pilbeam D.J. *Yield of willow cultivars at different planting densities in a commercial short rotation coppice in the north of England*. Biomass and Bioenergy, 2007 (31): 469–474.
29. Klasnja B., Kopitovic S., Orlovic S. *Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood*. Biomass and Bioenergy, 2002 (23): 427–432.
30. Tharakan P.J., Volk T.A., Abrahamson L.P., White E.H. *Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age*. Biomass and Bioenergy, 2003 (25): 571–580.
31. Ledin S. *Willow wood properties, production and economy*. Biomass and Bioenergy, 1996 (11): 75–83.
32. Fijałkowska D., Styszko L. *Ciepło spalania biomasy wierzbowej*. Rocznik Ochrony Środowiska, 2011, 53 (13): 875–890.
33. Komorowicz M., Wróblewska H., Pawłowski J. *Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 2009 (40): 402–410.
34. Stolarski M. *Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (Salix spp.) jako surowca energetycznego*. Rozprawy i Monografie. Wydawnictwo UWM. Olsztyn 2009: 145.

35. Van Loo S., Koppejan J. *Biomass combustion and cofiring*. Earthscan. Londyn 2008: 442.
36. Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M. *Ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby w jednorocznym i trzyletnim cyklu zbioru*. Roczniki Ekonomii Rolnictwa i Rozwoju Obszarów Wiejskich, 2013 (1): 211–219.
37. Rosenqvist H., Dawson M. *Economics of willow growing in Northern Ireland*, Biomass and Bioenergy, 2005, 28 (1): 7–14.
38. Rosenqvist H., Aronsson P., Hasselgren K., Perttu K. *Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops*. Biomass and Bioenergy, 1997, 12 (1): 1–8.
39. Borjesson P., Berndes G. *The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden*. Biomass and Bioenergy, 2006, 5 (30): 428–438.
40. Dimitriou I., Eriksson J., Adler A., Aronsson P., Verwijst T. *Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood – ash mixtures to short-rotation willow coppice*. Environmental Pollution, 2006, 142 (1): 160–169.
41. Styles D., Thorne F., Jones M. B. *Energy crops in Ireland: An economic comparison of willow and Miscanthus production with conventional farming systems*. Biomass and Bioenergy, 2008, 32 (5): 407–421.
42. Grzybek A., Gradziuk P. *Prospects for solid biomass use in energy production in Poland and its technical and economic properties*. Wyd. Wieś Jutra. Warszawa 2006: 83.
43. Melin G., Larsson S. *Agrobransle AB – world leading company on short rotation coppice willow*. In: *Proceedings of 14<sup>th</sup> European Biomass Conference*. Paris 2005: 36–37.
44. Stolarski M., Krzyżaniak M., Szczukowski S., Tworkowski J. *Efektywność energetyczna produkcji biomasy wierzby w jednorocznym i trzyletnim cyklu zbioru*. Fragmenta Agronomia, 2014 (w druku).
45. Kwaśniewski D. *Efektywność energetyczna produkcji biomasy z trzyletniej wierzby*. Inżynieria Rolnicza, 2010, 5 (123): 113–119.
46. Heller M. C., Keoleian G. A., Volk T. A. *Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system*. Biomass and Bioenergy, 2003 (25): 147–165.
47. Matthews R.W. *Modelling of energy and carbon budgets of wood fuel coppice systems*. Biomass and Bioenergy, 2001 (21): 1–19.
48. Piskier T. *Efektywność energetyczna uprawy wierzby w różnych warunkach glebowych*. Inżynieria Rolnicza, 2008, 2 (100): 215–220.
49. Tworkowski J., Szczukowski S., Stolarski M., Kwiatkowski J., Graban Ł. *Produkcijność i właściwości biomasy słazowca pensylwańskiego jako paliwa w zależności od materiału siewnego i obsady roślin*. Fragmenta Agronomia, 2014 (w druku).
50. Tworkowski J., Stolarski M., Wróblewska H., Szczukowski S. *Skład chemiczny i wartość energetyczna biomasy wierzby krzewiastej, słazowca pensylwańskiego i miskanta olbrzymiego*. Zszyty Problemy Postępów Nauk Rolniczych, 2010 (547): 401–408.
51. Stolarski M., Tworkowski J., Szczukowski S., Kwiatkowski J., Graban Ł. *Oplacalność i efektywność energetyczna produkcji biomasy słazowca pensylwańskiego w zależności od stosowanego materiału siewnego*. Fragmenta Agronomia, 2014 (w druku).
52. Kuś J., Matyka M. *Wybrane elementy agrotechniki roślin uprawianych na cele energetyczne*. W: *Nowoczesne technologie pozyskiwania i energetycznego wykorzystania biomasy*. Red. P. Bocian i in. Instytut Energetyki. Warszawa 2010, 101–120.

# MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA BIOMASY GLONÓW I NACZYNIOWYCH ROŚLIN WODNYCH NA CELE PRODUKCJI BIOGAZU

Autorzy:  
Mirostaw Krzemieniewski  
Marcin Dębowski  
Marcin Zieliński

## 1. Wstęp

Wieloletnie badania naukowe nad procesem fermentacji metanowej oraz zdobyte praktyczne doświadczenia związane z wdrażaniem systemów produkcji biogazu pozwoliły autorom niniejszej publikacji na stwierdzenie, iż istotnym ograniczeniem dla rozwoju procesów wytwarzania energii opartych na technologii fermentacyjnej jest przede wszystkim znalezienie źródła substratu o odpowiednich parametrach fizykochemicznych, którego pozyskiwanie i wykorzystanie w skali technicznej będzie uzasadnione pod względem ekonomicznym. Należy podkreślić, iż obecnie funkcjonują głównie biogazownie utylizacyjne, które bazują na wykorzystaniu ścieków, osadów czy innych biodegradowalnych odpadów organicznych, a w niewielkiej liczbie eksploatowane są biogazownie rolnicze oparte na wykorzystaniu biomasy roślinnej pochodzącej z upraw dedykowanych. Analiza tych danych stała się dla autorów podstawą i inspiracją do poszukiwania alternatywnych źródeł biomasy, które mogą zwiększyć podaż substratu wykorzystywanego w procesach fermentacyjnych.

Biorąc pod uwagę bardzo wysoką efektywność fotosyntetyczną, szybkie tempo przyrostu biomasy, odporność na różnego rodzaju zanieczyszczenia oraz możliwość zagospodarowania terenów, które nie mogą zostać wykorzystane na inne cele, kosubstratem dla typowych roślin energetycznych i innych substratów organicznych mogą być glony oraz rośliny naczyniowe pozyskiwane ze środowiska wodnego. Niewiele jest jednak doniesień literaturowych dotyczących wykorzystania biomasy hydrofitów jako substratu organicznego do produkcji biogazu w procesie fermentacji metanowej. Tematyka związana z możliwością wykorzystania biomasy hydrofitów pozyskiwanych z naturalnych akwenów wodnych w procesach fermentacji metanowej została podjęta przez autorów niniejszej monografii i realizowana w ramach projektu pt.: „Modelowe

kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii”, Projekt Kluczowy nr PO-IG.01.01.02-00-016/08, zadanie 1.3. Pozyskiwanie i przetwarzanie biomasy powstającej w zeutrofizowanych wodach powierzchniowych.

Zastosowanie rozwiązania technologicznego opartego na fermentacji i kofermentacji biomasy roślinności wodnej może prowadzić do uzyskania zarówno efektu energetycznego, jak i ekologicznego polegającego na ograniczeniu ilości obumarłej materii organicznej zasilającej naturalne zbiorniki wodne, co wpływa bezpośrednio na wyhamowanie tempa ich eutrofizacji i degradacji. Opracowanie właściwych parametrów technologicznych beztlenowego przetwarzania tego rodzaju substratu organicznego może również prowadzić do energetycznego wykorzystania biomasy roślinności wodnej pozyskiwanej podczas prac rekultywacyjnych, melioracyjnych oraz związanych z utrzymaniem odpowiedniego stanu rzek, kanałów, rowów melioracyjnych oraz brzegów zbiorników wody stojącej.

## **1.1. Kierunki wykorzystania roślinności wodnej na cele energetyczne**

Dane literaturowe wskazują na fakt, iż hydrofity mogą być potencjalnym źródłem wielu rodzajów biopaliw. Zaliczyć do nich można biogaz powstający w procesach beztlenowego rozkładu biomasy, biodiesel produkowany z lipidów kumulowanych w komórkach glonów, wodór pochodzący z przemian fotobiologicznych lub pozyskiwana biomasa roślinności wodnej może być przeznaczona do bezpośredniego spalania [20, 75, 95, 97].

Generalnie technologie konwersji biomasy roślinności wodnej do nośników energii można podzielić na dwie główne grupy związane z przetworzeniem termochemicznym i biochemicznym [30]. Jedną z technologii termochemicznych jest zastosowanie procesu zgazowania, czyli częściowego utlenienia biomasy w temperaturze mieszczącej się w zakresie od 800°C do 1000°C [15]. W tym rozwiązaniu biomasa reaguje z tlenem oraz parą wodną, czego bezpośrednim efektem jest generowanie gazu syntezowego, czyli mieszaniny CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N i CH<sub>4</sub> [26, 80]. Procesem prowadzącym do pozyskania biopaliwa ciekłego jest technologia oparta na termochemicznym upłynnianiu biomasy różnego rodzaju roślinności wodnej, głównie glonów [95]. Proces prowadzony jest w temperaturach mieszczących się w granicach od 300°C do 350°C oraz pod ciśnieniem 5,0–20,0 MPa. Reakcje termochemiczne prowadzące do wytworzenia biooleju przebiegają w obecności wodoru jako katalizatora procesu [28, 41, 79, 86].

Kolejną technologią stosowaną do przetwarzania biomasy roślinności wodnej na biopaliwo jest piroliza. W porównaniu do innych prezentowanych w literaturze metod jest to rozwiązanie opisane jako obiecujące i przynoszące bardzo dobre rezultaty, które dają nadzieję na zastosowanie pirolizy w instalacjach pracujących w skali technicznej [82, 83]. Wiele wyników badań prezentowanych w literaturze wskazuje, iż bioolej pozyskiwany z biomasy glonów w ten sposób charakteryzuje się wyższą jakością od biopaliwa pozyskiwanego podczas pirolizy roślin lignocelulozowych [27, 83].

Roślinność wodna może być również źródłem alkoholu etylowego [50, 132]. Przeprowadzone dotychczas prace badawcze potwierdzają, iż w określonych warunkach produkcja alkoholu etylowego z biomasy roślin wodnych, głównie glonów, jest technicznie wykonalna i ekonomicznie uzasadniona. W większości przypadków jednak fermentacja alkoholowa stosowana jest jako dodatkowy zabieg technologiczny, do którego kierowane są odpady pochodzące z ekstrakcji oleju z biomasy glonów [15].

Eksperymenty potwierdzają fakt, iż mikroalgi posiadają niezbędne genetyczne, metaboliczne i enzymatyczne uwarunkowania do wytwarzania  $H_2$  w procesie przemian biochemicznych [38]. W warunkach beztlenowych wodór wytwarzany jest w szlakach metabolicznych glonów eukariotycznych jako dawca elektronów w procesie wiązania  $CO_2$ . Stwierdzono, iż tego rodzaju mechanizm może przebiegać zarówno w warunkach jasnych, jak i bez dopływu energii świetlnej [1, 11, 35, 43, 81, 87]. Większość dotychczasowych publikacji naukowych dotyczących tego obszaru badawczego donosi o wysokiej skuteczności w procesie produkcji  $H_2$  jednokomórkowych glonów z gatunku *Chlamydomonas reinwardtii* powszechnie występującego w glebie i wodach słonych [117, 130, 135, 141]. Szereg publikacji potwierdza możliwość uzyskania biowodoru w technologii wykorzystującej glony z rodzaju *Platymonas subcordiformis*. Proces prowadzony jest w cyklicznie następujących po sobie warunkach zaciemnienia i światła przy dodatku zewnętrznego źródła węgla [44, 45].

## 1.2. Wykorzystanie biomasy hydrofitów w procesach fermentacji metanowej

Metodą biochemicznej konwersji biomasy hydrofitów pozyskiwanej w zeutrofizowanych wodach powierzchniowych do gazowego nośnika energii jest zastosowanie procesu fermentacji metanowej. Szacuje się, że jest to wysoce opłacalne i ekonomicznie uzasadnione rozwiązanie technologiczne [113]. Dodatkowym produktem procesu – oprócz wysokoenergetycznego biogazu – jest osad pofermentacyjny, który może zostać wykorzystany w sposób bezpośredni jako nawóz dla roślin ładowych [92, 96].

Bardzo istotnym elementem, który w wielu przypadkach decyduje o opłacalności wykorzystania biomasy hydrofitów na cele produkcji biogazu, jest wybór technologii ich pozyskiwania [25]. Źródła pozyskiwania biomasy mikroglonów, makroglonów, makrofitobentosu oraz wodnych roślin naczyniowych mogą być bardzo różne. Zaliczyć do nich można zamknięte systemy namnażania biomasy, układy otwarte, hydrofitowe systemy oczyszczania ścieków, a także naturalne zbiorniki wodne.

Powszechnie wykorzystywanymi systemami służącymi do namnażania i hodowli biomasy mikroglonów i makroglonów na cele energetyczne są obiekty eksploatowane w warunkach kontrolowanych. Zaliczyć do nich należy układy otwarte oraz zamknięte o różnej konstrukcji [131, 100, 57, 75, 74, 19]. Systemy otwarte to m.in. tradycyjne stawy ziemne lub betonowe, stawy kołowe z mieszaniem mechanicznym, stawy typu toru wyścigowego z kołem łopatkowym oraz stawy kaskadowe [6, 24]. Systemy zamknięte to fotobioreaktory o różnej konstrukcji. W odróżnieniu od systemów otwartych, zapewniają one możliwość stałej kontroli nad natężeniem i czasem naświetlania, temperaturą medium hodowlanego, ograniczają możliwość dostępu drapieżników, pasożytów oraz konkurencyjnych gatunków glonów. Do najczęściej wykorzystywanych fotobioreaktorów zalicza się: system workowy, fotobioreaktory rurowe o orientacji poziomej, pionowej lub pochylone pod dowolnym kątem, reaktory typu Biocoil oraz fotobioreaktory płytowe [131, 100, 57]. Fotobioreaktory są urządzeniami dużo bardziej uniwersalnymi, które mogą być stosowane w różnych strefach klimatycznych. W takich warunkach prowadzone mogą być hodowle specyficznych gatunków glonów, np. o wysokiej koncentracji oleju w biomase. Niestety dotychczas nie udało się opracować systemu, którego wykorzystanie jest uzasadnione pod względem opłacalności ekonomicznej. Konstrukcja fotobioreaktorów jest kosztowna, wymagają wysokich nakładów eksploatacyjnych (naświetlanie, dostarczanie dwutlenku węgla) oraz sprawiają trudności eksploatacyjne, np. poprzez zarastanie i ograniczenie przenikania światła [73, 109, 53, 36].

Jednym z potencjalnych źródeł pozyskiwania biomasy glonów na cele produkcji biogazu są również naturalne, zeutrofizowane i zdegradowane zbiorniki wodne [150]. Istniejące doniesienia dotyczące produkcji biogazu z biomasy glonów z akwenów naturalnych dotyczą głównie wykorzystania sinic pochodzących z zeutrofizowanych jezior w Chinach [149, 146, 150], pozyskiwanego na niewielką skalę makrofitobentosu [134, 78, 8, 42] lub teoretycznych rozważań, szacunków i kalkulacji potencjału tego typu rozwiązań technologicznych [113, 29, 47, 104, 148, 16]. Słuszność podejmowanych prób pozyskiwania glonów ze środowiska naturalnego potwierdza fakt, iż potencjał tego źródła biomasy jest olbrzymi i może dochodzić do setek ton w ciągu doby [150]. Dotychczasowe badania pozwalają stwierdzić, iż tego



rodzaju substrat jest obecnie coraz częściej brany pod uwagę jako potencjalne źródło materii organicznej stosowanej w procesach produkcji biogazu [149, 146, 150, 72, 70].

Intensywne zakwity sinic są coraz powszechniejszym zjawiskiem obserwowanym w wielu naturalnych akwenach wodnych na całym świecie, które wpływa bezpośrednio na zburzenia naturalnych funkcji akwenów wodnych, powoduje zagrożenie dla rozwoju turystyki, rekreacji oraz ogranicza możliwość wykorzystania gospodarczego. W ciągu ostatnich kilku lat tego rodzaju zjawisko występuje systematycznie w jeziorach Chaohu, Taihu czy Dianchi w Chinach [101, 102]. Guo [46] opisuje jezioro Taihu, które jest trzecim co do wielkości jeziorem w Chinach zapewniającym dostawy wody pitnej dla ponad dwóch milionów osób. Zakwity jednokomórkowych sinic obserwowane systematycznie od 2007 roku stały się realnym zagrożeniem powodującym trudności technologiczne w procesie uzdatniania wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Zhong i in. [150] opisują możliwość wykorzystania biomasy glonów z tego akwenu, głównie *Cyanoprokryota*, w procesie fermentacji metanowej.

Wykorzystanie biomasy glonów pochodzących z naturalnych zbiorników wodnych, szczególnie w przypadku akwenów zlokalizowanych w strefie umiarkowanej, związane jest z wieloma ograniczeniami [7]. Zaliczyć do nich należy elementy związane ze zmiennymi warunkami klimatycznymi. Wpływają one bezpośrednio na ilość biomasy możliwej do pozyskania, strukturę taksonomiczną glonów, charakterystykę i właściwości pozyskanego w ten sposób substratu organicznego. W okresach zimowych, z uwagi na ograniczenie tempa wegetacji, znikomą koncentrację biomasy glonów w naturalnych zbiornikach wodnych oraz występującą często pokrywę lodową jej pozyskiwanie jest nieefektywne zarówno pod względem technologicznym, jak i ekonomicznym.

Wykorzystanie wodnych roślin wyższych związane jest często z ich pozyskiwaniem ze zbiorników o podwyższonej żyzności, a także miejsc zlokalizowanych w ich pobliżu. Przetwarzana energetycznie może być również biomasa produkowana w hydrofitowych systemach oczyszczania ścieków. Zasadniczo środowiska te sprzyjają przyrostowi biomasy, która wykorzystana w celach energetycznych przyczynia się do zmniejszenia m.in. trofii zbiorników wodnych [60]. Hydrofity w wielu przypadkach stanowią surowiec naturalnie występujący, co ogranicza nakłady finansowe związane z ich uprawą, w przeciwieństwie do dedykowanych, lądowych upraw energetycznych, gdzie istotne koszty związane są z siewem, nawożeniem i właściwym utrzymaniem plantacji poprzez stosowanie np. środków ochrony roślin. Makrofity są często materiałem odpadowym pochodzącym z konserwacji różnego rodzaju urządzeń melioracyjnych istotnych dla rolnictwa i gospodarki wodnej. Tego rodzaju biomasę można pozyskiwać 2–3 razy w ciągu sezonu wegetacyjnego [37].

W trakcie realizacji prac związanych z pozyskiwaniem roślinności wodnej naczyniowej w procesie oczyszczania brzegów i dna zbiorników wodnych należy stosować się do przepisów zawartych w regulacjach prawnych w zakresie ochrony środowiska. Ze względu na specyfikację i położenie akwenów wodnych, przed przystąpieniem do wykonania prac związanych z pozyskiwaniem biomasy roślinności wodnej należy sprawdzić, czy brzegi zbiornika wodnego – zwłaszcza wysokie lub na łukach – nie są podmyte przez wodę i czy nie zachodzi niebezpieczeństwo osunięcia się brzegu. Są to zwykle prace o utrudnionym dostępie do obiektów, często bez możliwości poruszania się wzdłuż obiektu środkami transportowymi. Organizując prace związane z pozyskiwaniem biomasy wodnej do celów produkcji biogazu na naturalnych zbiornikach wodnych, należy je rozpocząć od ujścia, umożliwiając swobodny przepływ wody. W czasie trwania robót należy na bieżąco usuwać zbierające się w dnie porosty traw i inne zanieczyszczenia. Roboty konserwacyjne na rzekach, kanałach i wałach przeciwpowodziowych mogą być wykonywane ręcznie, przy użyciu prostych narzędzi, takich jak: kosa, łopata, szpadel, haka, grabie, widły i siekiery oraz mechanicznie przy użyciu takiego sprzętu jak: koparki, koparko-odmularki, spycharki, kosiarki pływające, ciągniki, tam gdzie warunki terenowe pozwolą na użycie sprzętu mechanicznego. Wykonawca tego rodzaju prac jest zobowiązany do używania jedynie takiego sprzętu, który nie powoduje niekorzystnego wpływu na jakość wykonywanych robót i na środowisko.

Koszenie mechaniczne dotyczy zwykle pozyskiwania biomasy roślinności wodnej z dna jezior lub rzek o znacznej szerokości. Wykonuje się je kosiarką pływającą z odpowiednim oprzyrządowaniem. W przypadku wałów przeciwpowodziowych koszenie korony i skarp powinno zostać zrealizowane zgodnie z wcześniej przygotowanym i zatwierdzonym przedmiarem robót. Wydobycie biomasy makrohydrofitów ze zbiorników wodnych przeprowadza się niezwłocznie po wykonaniu koszenia i zgromadzenia wykoszonej roślinności w ustalonym miejscu. Projektowaną technologię oraz sprzęt wykorzystywany do oczyszczania zbiorników wodnych z nadmiaru roślinności stosuje z uwzględnieniem specyfiki analizowanego akwenu.

### **1.3. Ograniczenia związane z wykorzystaniem hydrofitów na cele produkcji biogazu**

Istotnym elementem wpływającym na fakt ograniczonego zainteresowania biomasą roślinności wodnej jako alternatywnym źródłem biodegradowalnej materii organicznej stosowanej w systemach produkcji biogazu są trudności związane ze stosowaniem tego rodzaju substratu. Dotychczasowe badania sygnalizują fakt, iż istnieje kilka czynników, które limitują efektywność proce-

su fermentacji metanowej oraz mogą wydajnie ograniczać lub całkowicie hamować mechanizm wytwarzania biogazu w technologiach wykorzystujących biomasę hydrofitów [13, 14, 46, 145, 149, 103]. Do tego rodzaju czynników zaliczyć można odporne na rozkład w warunkach beztlenowych ściany komórkowe zawierające związki celulozy lub hemicelulozy, szczepy glonów wytwarzających substancje i związki toksyczne dla bakterii beztlenowych oraz nieodpowiedni stosunek C:N w biomase roślinności wodnej poddawanej procesom fermentacji [77, 143, 144]. Wykorzystanie biomasy glonów i makrofitów pochodzących z zeutrofizowanych wód powierzchniowych może również powodować trudności eksploatacyjne i technologiczne w systemach wytwarzania biogazu. Wiązą się one ze zmienną jakością biomasy pochodzącej z tego źródła oraz trudnościami z zapewnieniem podaży substratu na stałym poziomie [75, 7, 116].

Stosunek C:N w substratach wprowadzanych do komór fermentacyjnych powinien wynosić od 20:1 do 30:1. W większości przypadków, w których stosowano biomasę hydrofitów, wartość C:N była poniżej 10, co bezpośrednio wpływało na ograniczenie efektywności procesów fermentacyjnych [93]. Wysoka zawartość białka w biomase glonów może prowadzić do zwiększonej produkcji wolnego amoniaku oraz lotnych kwasów tłuszczowych, które działają toksycznie na mikroorganizmy odpowiedzialne za procesy fermentacji metanowej. Ponadto jony sodu występujące w biomase roślin wodnych pochodzących z wód słonych mogą hamować proces metanogenezy. Istnieją jednak doniesienia opisujące możliwość wpracowania i adaptowania mikroorganizmów osadu beztlenowego do sprawnej fermentacji biomasy glonów morskich [59, 110].

Jednym ze sposobów na zwiększenie wartości stosunku C:N jest dodanie do mieszaniny substratowej biomasy o wysokiej koncentracji węgla organicznego [12]. Yen i Brune [145] osiągnęli znaczny wzrost produkcji metanu w wyniku kofermentacji odpadów celulozowych oraz biomasy glonów. Szybkość produkcji metanu wzrosła do poziomu  $1,17 \text{ cm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$  w wariancie, w którym stosunek odpadów organicznych i biomasy glonów wynosił 1:1, w porównaniu do wartości  $0,57 \text{ cm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$  w wariancie, w którym procesowi fermentacji poddawano jedynie glony.

W wielu dotychczasowych badaniach związanych z wykorzystaniem biomasy roślinności wodnej w procesach fermentacyjnych sygnalizowano inne trudności technologiczne i techniczne związane z prowadzeniem procesu, do których zaliczyć należy m.in. skomplikowany proces pozyskiwania tego rodzaju biomasy, duże uwodnienie początkowe, trudności związane z przechowywaniem i wysokie koszty odwadniania [8]. Główne zagadnienia związane z technologią dotyczą wyboru odpowiedniego czasu zatrzymania, ładunku substancji organicznej wprowadzanej do bioreaktorów fermentacyjnych, sposobu kondycjonowania i wstępnego przygotowania biomasy [40, 116, 146].

## **1.4. Potencjalne korzyści wykorzystania biomasy glonów na cele produkcji biogazu**

Mimo ograniczeń, które są związane z wykorzystaniem biomasy hydrofitów na cele produkcji biogazu, dotychczasowe badania pozwalają upatrywać ją jako alternatywne i perspektywiczne źródło substratu organicznego [72, 70, 20]. Organizmy wodne posiadają szereg zalet w stosunku do typowych, uprawnych roślin energetycznych. Udowodniono, iż glony, głównie morskie, zawierają w swoim składzie biochemicznym duże ilości polisacharydów oraz substancji tłuszczowych, a także cechują się brakiem trudno rozkładalnych związków lignocelulozowych [134]. Rośliny wodne charakteryzują się wyższym tempem przyrostu biomasy, a możliwość pozyskiwania z naturalnych akwenów wodnych wpływa na to, iż nie stanowią konkurencji dla upraw dedykowanych na cele żywieniowe lub paszowe [105, 127].

Dotychczasowe autorskie badania, jak również wyniki zaprezentowane w niniejszej pracy dowodzą, iż fermentacja metanowa jest efektywną technologią przetwarzania biomasy glonów na cele energetyczne. Potwierdzają to również prace Harun i in. [47], którzy przeprowadzili wielowariantową kalkulację opłacalności różnego rodzaju metod energetycznego wykorzystania glonów morskich. Teoretyczny model udowodnił, iż najbardziej uzasadnionym pod względem energetycznym i ekonomicznym jest wariant, w którym cała biomasa glonów jest przetwarzana w procesie fermentacji metanowej [47]. Dodatkowym produktem procesu oprócz wysokoenergetycznego biogazu jest osad pofermentacyjny, który może zostać wykorzystany w sposób bezpośredni jako nawóz dla roślin lądowych lub po prostym przetworzeniu zawrócony do systemu hodowli biomasy glonów jako komponent pożywki [92, 96].

## **1.5. Zastosowanie makroglonów w procesach fermentacji metanowej**

Badania nad wykorzystaniem makroglonów z gromady brunatnic w procesach fermentacji metanowej prowadził Vergara-Fernández [134]. Testował on możliwość zastosowania biomasy makroglonów *Macrocystis pyrifera*, *Durvillea antarctica* oraz substratu opartego na mieszaninie tych gatunków. Badania udowodniły, iż niezależnie od testowanego substratu uzyskano porównywalną wydajność produkcji biogazu, która kształtowała się na poziomie  $180,4 \pm 1,5$   $\text{cm}^3/\text{g s.m.} \cdot \text{d}$ . Zastosowanie mieszaniny glonów wpłynęło bezpośrednio na fakt, iż wydajność produkcji biogazu była niższa i kształtowała na poziomie bliskim  $158,3$   $\text{cm}^3/\text{g s.m.} \cdot \text{d}$ . Zawartość procentowa metanu w gazowych produktach metabolizmu bakterii beztlenowych kształtowała się w zakresie od 60%

do 70%, przy średniej na poziomie bliskim 65%, niezależnie od gatunku testowanej biomasy glonów [134].

Singh i Gu [115] oraz Parmar i in. [94] również analizowali wydajność produkcji biogazu przy wykorzystaniu roślin makrofitobentosowych jako substratu organicznego. Najwyższe efekty technologiczne zanotowano podczas fermentacji *Brunatnica Laminaria Digitata* należąca do rzędu *Listownic*. Produkcja metanu w tym przypadku była bardzo wysoka i wynosiła 500 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o. Wykorzystanie *Macrocystis sp.* pozwoliło na uzyskanie 390–410 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o., *Gracilaria sp.* 280–400 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup>, *Laminaria sp.* 260–280 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup>. Najniższe efekty końcowe stwierdzono w procesie fermentacji glonów z klasy zielenic *Ulva sp.* zaledwie 200 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m. [94, 115].

Tabela 1  
Efektywność produkcji biogazu przy wykorzystaniu makroglonów jako substratu w procesach fermentacji metanowej

Takson	Ilość biogazu/metanu	Autor
<i>Macrocystis pyrifera</i>	181,4 ± 52,3 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m. · d	Vergara-Fernández (2008)
<i>Macrocystis pyrifera</i> + <i>Durvillea antarctica</i>	164,2 ± 54,9 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m. · d	Vergara-Fernández (2008)
<i>Durvillea antarctica</i>	179,3 ± 80,2 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m. · d	Vergara-Fernández (2008)
<i>Laminaria sp.</i>	0,26–0,28 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Singh i Gu (2010), Parmar i in. (2011)
<i>Gracilaria sp.</i>	0,28–0,4 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Singh i Gu (2010) Parmar i in. (2011)
<i>Macrocystis</i>	0,39–0,41 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Singh i Gu (2010) Parmar i in. (2011)
<i>Laminaria Digitata</i>	0,50 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Singh i Gu (2010) Parmar i in. (2011)
<i>Ulva sp.</i>	0,20 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Singh i Gu (2010) Parmar i in. (2011)
<i>Macrocystis sp.</i>	189,89 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Yuan i in. (2011)
<i>Ulva lactuca</i>	157–271 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Bruhn i in. (2011)
<i>Pilayella</i> + <i>Ectocarpus</i> + <i>Enteromorpha</i>	40,0–54,0 cm <sup>3</sup> /g 29,2–39,4 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g	Grala i in. (2012)

Badania Dębowskiego i in. [19] udowodniły, iż efekty fermentacji makroglonów pochodzących z Zatoki Puckiej były bezpośrednio uzależnione od zastosowanego obciążenia komory beztlenowej ładunkiem związków organicznych. Najwyższy poziom produkcji metanu przypadający na wprowadzoną do reaktora masę organiczną na poziomie 240 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g s.m.o. zanotowano w zakresie stosowanych obciążeń od 1 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d do 2 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d. Zastosowanie wyższych wartości tego parametru technologicznego wpływało

bezpośrednio na ograniczenie produkcji metanu [19]. Yuan i in. [146] udowodnili natomiast, iż produkcja metanu w przypadku fermentacji sinic wynosiła 189,89 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g s.m.o. Zeng i in. [149] analizowali przebieg procesu fermentacji metanowej biomasy glonów z dominującym gatunkiem *Macrocystis* sp. (współfermentowane z gnojowicą bydłą). Wydajność produkcji metanu w tym eksperymencie wynosiła 153,66 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g s.m.o. W innych badaniach zmierzających do określenia efektywności produkcji biogazu wykorzystywano m.in. makroalgi, do których można zaliczyć *Laminaria* sp., *Macrocystis* sp. [13, 14], *Gracilaria cecae* [142], *Ulva* sp. [8]. Badania potwierdzają możliwość wykorzystania tego rodzaju substratu organicznego w procesach fermentacji metanowej.

W pracach eksperymentalnych Vergara-Fernández [134] stwierdzono wysoką koncentrację NH<sub>3</sub>, która wynosiła około 1,0% oraz H<sub>2</sub>S na poziomie 0,1% w biogazie. Udowodniono, iż znaczna koncentracja NH<sub>3</sub> związana była z wysoką koncentracją azotu w wykorzystywanych w eksperymencie glonach morskich, mieściła się w zakresie od 15,8 mg/g s.m. dla *Macrocystis pyrifera* oraz 16,7 mg/g s.m. dla *Durvillea antarctica*. Uzyskiwane efektywności produkcji biogazu przy wykorzystaniu makroglonów jako substratu w procesach fermentacji metanowej zaprezentowano w tabeli 1.

## 1.6. Zastosowanie mikroglonów w procesach fermentacji metanowej

Pierwsze próby fermentacji metanowej biomasy mikroglonów opartej na mieszanej kulturze *Chlorella* sp. i *Scenedesmus* sp. przeprowadził Golueke i in. [39]. Dodatkowo dokonali porównania efektywności procesu fermentacji biomasy glonów oraz osadów ściekowych. Stwierdzono, iż ilość biogazu przypadającą na kg suchej masy organicznej oraz skład jakościowy gazowych produktów metabolizmu bakterii beztlenowych były porównywalne dla dwóch testowanych substratów. W przypadku osadów ściekowych wydajność procesu fermentacji wynosiła 1,02 m<sup>3</sup>/kg s.m.o., natomiast dla biomasy glonów kształtowała się na poziomie 0,986 m<sup>3</sup>/kg s.m.o. Koncentracja metanu w biogazie mieściła się w granicach 61–63% [39].

Zamalloa i in. [147], którzy analizowali możliwość fermentacji powszechnie występujących w wodach słodkich glonów *Scenedesmus obliquus* (*Chlorophyta*), glonów morskich *Phaeodactylum tricorutum* z gromady *Bacillariophyceae* oraz sinic z gatunku *Spirulina platensis*. Po 30 dniach inkubacji uzyskano 210 ± 3,0 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g s.m.o. w przypadku testowania *Scenedesmus obliquus* oraz 350 ± 3,0 cm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/g s.m.o., w wariancie, w którym do modelowych komór fermentacyjnych wprowadzano biomasę *Phaeodactylum tricorutum*. Dla po-

równania parametry charakteryzujące proces fermentacji w przypadku testowania biomasy sinicy *Spirulina platensis* kształtowały się następująco: wydajność produkcji metanu  $280 \pm 0,8 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$  po 30 dniach inkubacji.

Badania nad fermentacją różnych grup taksonomicznych mikroglonów prowadzili również inni badacze. Mussgnug i in. [90] podczas eksperymentów testowali sześć gatunków fitoplanktonowych, występujących powszechnie w wodach słodkich oraz słonych (*Chlamydomonas reinwardtii*, *Dunaliella salina* oraz *Scenedesmus obliquus* należące do klasy *Chlorophyceae*, *Chlorella kessleri* należąca do klasy *Trebouxiophyceae*, *Euglena gracilis* należąca do klasy *Euglenoidea* oraz sinice *Arthrospira platensis* z klasy *Cyanophyceae*. Glony z gatunku *Dunaliella salina* oraz *Arthrospira platensis* to organizmy słonowodne, pozostałe gatunki należą do glonów słodkowodnych.

Udowodniono, iż potencjał produkcji biogazu uzależniony jest bezpośrednio od gatunku, natomiast nie stwierdzono korelacji między grupą taksonomiczną a efektywnością procesu. Fermentując glony *Chlamydomonas reinhardtii* z gromady *Chlorophyta*, uzyskano produkcję biogazu na poziomie  $587 \pm 8,8 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$ , *Dunaliella salina* –  $505 \pm 24,8 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  Poddanie procesom beztlenowym sinic *Arthrospira platensis* oraz *Euglena gracilis* skutkowało efektywnością wytwarzania gazowych produktów metabolizmu bakterii fermentacyjnych wynoszącą kolejno  $481 \pm 13,8 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  oraz  $485 \pm 3,0 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  Produkcja biogazu z biomasy glonów *Chlorella kessleri* oraz *Scenedesmus obliquus* była najniższa i kształtowała się na poziomie  $335 \pm 7,8 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  oraz  $287 \pm 10,1 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  [90]. Autorzy postulują, iż produkcja biogazu nie jest uzależniona od grupy taksonomicznej glonów i na podstawie klasyfikacji systematycznej nie można przewidzieć potencjalnej efektywności procesu fermentacji. Badacze wnioskują, iż w celu precyzyjnego określenia ilości oraz składu wytwarzanego biogazu należy prowadzić indywidualne badania weryfikacyjne dla każdego z testowanych gatunków. Prawdopodobnie istotnym elementem warunkującym podatność poszczególnych gatunków i grup taksonomicznych glonów jest budowa ścian komórkowych.

W raportowanych w literaturze pracach badawczych sygnalizuje się korelację między budową komórek testowanych mikroglonów a podatnością na rozkład biomasy w warunkach beztlenowych oraz intensywność produkcji biogazu. Wszystkie łatwo biodegradowalne gatunki glonów, które pozwoliły na uzyskanie wysokich efektów technologicznych, charakteryzowały się brakiem ściany komórkowej, jak w przypadku *Dunaliella salina* [112] lub ściana komórkowa nie zawiera trudno rozkładalnych komponentów celulozowych i hemicelulozowych, a jej budowa oparta jest na substancjach białkowych, jak w przypadku *Chlamydomonas reinwardtii* [84], *Arthrospira platensis* [133] oraz *Euglena gracilis* [91]. W przeciwieństwie do wymienionych powyżej

gatunków *Chlorella kessleri* oraz *Scenedesmus obliquus* charakteryzują ścianą komórkową opartą na hemicelulozie [128, 129]. Ściana komórkowa *Scenedesmus obliquus* w literaturze opisywana jest jako szczególnie trudna do zniszczenia ze względu na fakt występowania w niej biopolimeru sporopoleniny [9]. Jeszcze bardziej złożona jest ściana komórkowa *Bcillariophyceae* zbudowana z krzemionki [49].

Uzyskane dane wskazują, że obecność i skład ściany komórkowej jest głównym powodem różnic związanych z degradacją biomasy glonów w warunkach beztlenowych oraz wydajnością produkcji biogazu wykazanych w badaniach własnych. Prowadząc selekcję mikroglonów pod kątem prowadzenia fermentacji metanowej, powinno się preferować szczepy glonów bez ściany komórkowej lub ściany komórkowej pozbawionej związków hemicelulozy. Jednak nawet w takim przypadku nie można wykluczyć, że glony bez sztywnej ściany komórkowej mogą stanowić nieodpowiedni substrat do prowadzenia wydajnego procesu fermentacji, z uwagi na możliwość występowania substancji toksycznych dla mikroorganizmów beztlenowych [59, 110, 49].

De Schamphelaire i Verstraete [17] zaprezentowali badania nad efektywnością produkcji biogazu mieszanych kultur mikroglonów słodkowodnych. Zastosowanie początkowego obciążenia okresowych reaktorów fermentacyjnych na poziomie  $0,6 \text{ g s.m.o./dm}^3 \cdot \text{d}$  pozwoliło na uzyskanie produkcji metanu na poziomie  $310 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$  po 45 dniach zatrzymania biomasy w układzie technologicznym.

Samson i LeDuy [106, 107, 108] fermentowali biomasę sinic z gatunku *Spirulina Maxima* w reaktorze eksploatowanym przy obciążeniu  $1,0 \text{ g s.m.o./dm}^3 \cdot \text{d}$  oraz czasie zatrzymania równym 33 doby. Zanotowali, iż produkcja metanu w procesie mezofilowym kształtowała się na średnim poziomie  $240 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$ , przy obserwowanej efektywności rozkładu biomasy organicznej zawierającej się w zakresie od 68,0 do 72,0%. Ras i in. [103] uzyskali wydajność produkcji biogazu wynoszącą  $150 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$  oraz  $240 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$  przy zastosowaniu czasu hydraulicznego zatrzymania odpowiednio 16 dni oraz 28 dni. W eksperymencie stosowano biomasę *Chlorella vulgaris*, a obciążenie eksploatowanych reaktorów fermentacyjnych utrzymywane było na poziomie  $1 \text{ g ChZT/dm}^3 \cdot \text{d}$ . Efektywność konwersji biomasy do gazowych produktów metabolizmu bakterii beztlenowych mieściła się w zakresie od 29 do 49%.

Podobne obserwacje potwierdzili w swoich doświadczeniach Zamalloa i in. [148]. W przypadku testowania biomasy *Spirulina platensis* stwierdzono, iż stosunek ChZT:N wynosił  $10,3 \pm 0,6$ . Związane to było z bardzo wysokim udziałem białek w biomacie sięgającym w tym przypadku do 60%. Stosunek substancji węglowych wyrażonych wskaźnikiem ChZT do azotu w przypadku dwóch innych testowanych gatunków glonów były porównywalne i kształ-



towały się na poziomie  $15,6 \pm 7,4$  dla *Scenedesmus obliquus* oraz  $13,4 \pm 3,4$  dla *Phaeodactylum tricornutum*. Efektywność produkcji biogazu przy wykorzystaniu mikroglonów jako substratu w procesach fermentacji metanowej zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2  
Efektywność produkcji biogazu przy wykorzystaniu mikroglonów jako substratu w procesach fermentacji metanowej

Takson	Ilość biogazu/metanu	Autor
<i>Scenedesmus sp. + Chlorella sp.</i>	0,986 m <sup>3</sup> /kg s.m.o.	Golueke i in. (1957)
<i>Scenedesmus sp + Chlorella sp.</i>	180 ± 8 cm <sup>3</sup> /dm <sup>3</sup> · d 573 ± 28 cm <sup>3</sup> / dm <sup>3</sup> · d 818 ± 96 cm <sup>3</sup> / dm <sup>3</sup> · d	Yen i Brune (2007)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	210 ± 3,0 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Zamalloa i in. (2012)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	350 ± 3,0 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Zamalloa i in. (2012)
<i>Spirulina platensis</i>	280 ± 0,8 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Zamalloa i in. (2012)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	587 ± 8,8 cm <sup>3</sup> /g s.m.o	Mussgnug i in. (2010)
<i>Dunaliella salina</i>	505 ± 24,8 cm <sup>3</sup> /g s.m.o.	Mussgnug i in. (2010)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	287 ± 10,1 cm <sup>3</sup> /g s.m.o.	Mussgnug i in. (2010)
<i>Chlorella kessleri</i>	335 ± 7,8 cm <sup>3</sup> /g s.m.o.	Mussgnug i in. (2010)
<i>Euglena gracilis</i>	485 ± 3,0 cm <sup>3</sup> /g s.m.o.	Mussgnug i in. (2010)
<i>Arthrospira platensis</i>	481 ± 13,8 cm <sup>3</sup> /g s.m.o.	Mussgnug i in. (2010)
<i>Spirulina maxima</i>	240 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Samson i LeDuy (1985)
<i>Chlorella vulgaris</i>	150 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	Ras i in. (2010)
	240 cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /g s.m.o.	

## 1.7. Kofermentacja biomasy glonów z typowymi roślinami energetycznymi

Według Mata-Alvarez i in. [77] wykorzystanie w procesach fermentacji mieszanej kompozycji substratowej może wpływać na poprawienie efektywności procesu fermentacji metanowej w stosunku do prowadzenia procesu dla każdego substratu z osobna. Dowodzą tego również badania prowadzone przez autora pracy [18, 23, 25]. W ten sposób dostarcza się do układu wszelkich niezbędnych dla rozwoju mikroflory bakterii beztlenowych mikroelementów i substancji odżywczych [144]. Według autorów pracy, a także innych badaczy dodatkowe korzyści związane z odpowiednim doбором kosubstratów mogą dotyczyć również innych czynników związanych z aspektami technologicznymi, ekonomicznymi oraz środowiskowymi występującymi w procesie fermentacji metanowej [144, 78, 12, 40, 22].

Biorąc pod uwagę rzeczywiste stężenie biomasy glonów występujące w naturalnych zbiornikach wodnych, należy stwierdzić, iż tego rodzaju substrat organiczny można traktować jako jeden ze składników kompozycji substratowej wprowadzanej do systemów fermentacyjnych eksploatowanych w skali technicznej [149, 146]. Tego rodzaju zabieg technologiczny może także wpłynąć na poprawę stosunku C:N w substracie organicznym dozowanym do reaktorów beztlenowych.

Mussnug i in. [90] stwierdzili, iż prowadząc proces fermentacji kiszonki kukurydzy oraz mikroglonów w tych samych warunkach technologicznych uzyskuje się wyższą efektywność produkcji metanu w przypadku testowania *Chlamydomonas reinhardtii* o 11%. W badaniach prowadzonych przez Zhong i in. [150] zastosowanym substratem były glony pochodzące z zatoki Meiliang na jeziorze Taihu w Chinach oraz kiszonka kukurydzy. W składzie gatunkowym dominowały sinice z rodzaju *Microcystis sp.* (99%). W badaniach użyto reaktory o objętości całkowitej 150 cm<sup>3</sup>, do których wprowadzano 2 g s.m.o. pochodzącej z biomasy glonów i kukurydzy. Te dwa podstawowe substraty dozowano w różnych proporcjach, co wpływało bezpośrednio na stosunek C:N w kolejnych wariantach eksperymentu, który wynosił kolejno 71:1, 25:1, 20:1, 16:1 i 6:1. W oparciu o całkowitą ilość biogazu wytworzona w ciągu 30 dni inkubacji można stwierdzić, iż najwyższe efekty technologiczne uzyskano w wariantach, gdzie stosunek C:N mieścił się w przedziale od 16:1 do 25:1. Wartość tego parametru mieściła się w zakresie od 922 cm<sup>3</sup> do 1184 cm<sup>3</sup>. Najwyższa procentowa zawartość metanu w biogazie obserwowana była w wariantach, w którym stosunek C:N kształtował się na poziomie 20 i wynosiła 54,9%. W innych przypadkach koncentracja metanu oscylowała wokół wartości 51% [150].

We wcześniejszych badaniach prowadzonych przez Dębowskiego i in. [18, 21] udowodniono pozytywny wpływ dodatku biomasy makroglonów pochodzących z Zatoki Puckiej na efektywność procesu fermentacji metanowej sianokiszonki oraz kiszonki kukurydzy. W wariantach najkorzystniejszych produkcja metanu kształtowała się na poziomie 373,1 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup> w warunkach statycznych oraz 386,8 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup> podczas badań prowadzonych w reaktorach przepływowych w przypadku testowania biomasy glonów i kiszonki kukurydzy [21]. Niższą efektywność procesu fermentacji zanotowano podczas fermentacji biomasy roślinności wodnej oraz sianokiszonki. W badaniach respirometrycznych produkcja metanu kształtowała się na poziomie 354,7 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup>, w fermentorach przepływowych natomiast 359,0 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Mg s.m.o.<sup>-1</sup> [18].

Wzrost efektywności procesu fermentacji podczas kofermentacji biomasy glonów oraz innych substratów organicznych przypisywany jest efektem synergistycznym, obecnym podczas beztlenowego rozkładu mieszanej kompozycji

substratowej. Biomasa glonów odgrywa rolę źródła azotu oraz mikrośladników koniecznych do odpowiedniego rozwoju mikroorganizmów beztlenowych. Mata-Alvarez i in. [77] udowodnił, iż wprowadzenie do bioreaktora fermentacyjnego kilku odpowiednio dobranych substratów wpływa bezpośrednio na istotne poprawienie końcowych efektów procesu beztlenowego. Matsui i Koike [78] eksploatowali pilotowy układ technologiczny, w którym podstawowym substratem organicznym były makroglony z rodzaju *Laminaria sp.* i *Ulva sp.* mieszane z innymi odpadami organicznymi. W swoich badaniach udowodnili, iż osiągnięcie stabilnych warunków pracy instalacji beztlenowej jest możliwe w przypadku dobrania odpowiednich proporcji roślin wodnych i testowanego kosubstratu.

## 1.8. Zastosowanie makrofitów środowiska wodnego w procesach fermentacji metanowej

Seppala i in. [111] zbadali wydajność produkcji biogazu dla 4 rodzajów traw, w tym dla mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinaceae* L.). Dla tego substratu uzyskali wydajność produkcji metanu na poziomie 296 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. przy 3-krotnie dłuższym okresie pomiarowym niż w prezentowanych badaniach. Stwierdzili ponadto, że dla prób zebranych w czerwcu ilość powstałego biogazu była około 35% wyższa w porównaniu do prób zebranych w sierpniu. Było to najprawdopodobniej spowodowane wyższą zawartością trudno rozkładalnych lignin w tkankach roślin pod koniec sierpnia. Badania te przeprowadzono bez jakiegokolwiek obróbki wstępnej.

Hu i Yu [51] przeprowadzili badania dotyczące podatności substratu pochodzącego z pałki szerokolistnej na rozkład w warunkach beztlenowych. Wykazali, że pałka szerokolistna może być wykorzystywana w procesie fermentacji. Uzyskali około 66% zmniejszenie zawartości związków organicznych w badanym substracie, nie dostarczyli jednak żadnych informacji o jakości i ilości powstającego biogazu. W innych badaniach Moorhead i Nordstedt [88] uzyskali wydajność produkcji biogazu od 200 do 280 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. Jako substrat wykorzystali hiacynt wodny (*Eichhornia crassipes*).

W badaniach prowadzonych przez Krzemieniewskiego i Mielcarka [71] testowano możliwość zastosowania w procesie fermentacji metanowej roślinności wyższej pochodzącej ze środowiska wodnego i wodno-błotnego. W doświadczeniach prowadzonych z wykorzystaniem pomiarów respirometrycznych procesowi fermentacji metanowej poddawano trzinę pospolitą (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), pałkę szerokolistną (*Typha latifolia* L.), tatarak zwyczajny (*Acorus calamus* L.) oraz rogotka sztywnego (*Ceratophyllum demersum* L. s.s.). Substraty wykorzystane w badaniach charakteryzowały się

uwodnieniem w przedziale od 63,52% (trzcina pospolita) do 89,51% (rogatek sztywny). Zawartość suchej masy organicznej w pałce szerokolistnej i tataraku zwyczajnym były na podobnym poziomie. Spośród wybranych substratów rogatek sztywny charakteryzował się najwyższym 30% udziałem substancji mineralnych w ogólnej suchej masie, gdzie dla trzciny pospolitej udział ten wynosił 16,06%, a dla pałki szerokolistnej i tataraku zwyczajnego odpowiednio 8,06% i 8,54%. Doświadczenia prowadzące do zweryfikowania potencjału produkcji biogazu z wykorzystywanej biomasy podzielono na cztery serie, których kryterium wydzielenia był gatunek testowanego hydrofitu. W serii pierwszej do respirometrów wprowadzano założone ilości trzciny pospolitej, w serii drugiej – pałki szerokolistnej, w serii trzeciej – tataraku zwyczajnego i w serii czwartej – rogatek sztywnego. W każdej serii zastosowano trzy warianty różniące się obciążeniem komory reakcyjnej ładunkiem związków organicznych, a mianowicie wariant I – 1 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d, wariant II – 2 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d, wariant III – 3 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d.

Najwyższą średnią wydajność produkcji biogazu uzyskano w serii I w wariantcie I – wyniosła ona 344 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. Najmniejszą ilość biogazu w przypadku stosowania obciążenia na poziomie 1 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d zanotowano w serii III i wyniosła ona 204 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. W tej serii zanotowano również najniższą produkcję biogazu w całym okresie badań na poziomie 132 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o., przy obciążeniu 3 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d. Przy tym obciążeniu komory reakcyjnej ładunkiem związków organicznych najwyższą wydajność produkcji biogazu uzyskano dla trzciny pospolitej (272 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o.).

Średni skład biogazu w przeprowadzonych badaniach dla obciążenia 1 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d zmieniał się w zakresie od 51,1% CH<sub>4</sub> dla tataraku zwyczajnego (najniższa średnia wartość zanotowana we wszystkich seriach i wariantach) do 58,1% CH<sub>4</sub> dla trzciny pospolitej. Dla obciążenia 2 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d ilość metanu w biogazie wynosiła od 55% w trzciny pospolitej do 61,5% dla rogatek sztywnego. Przy obciążeniu 3 kg s.m.o./m<sup>3</sup> · d uzyskano ilość metanu w biogazie od 51,5% dla tataraku zwyczajnego do 61,7% dla rogatek sztywnego (najwyższa średnia wartość uzyskana w badaniach).

Wielu badaczy twierdzi, iż zastosowanie fermentacji metanowej jest najbardziej perspektywnym i najefektywniejszym sposobem energetycznego wykorzystania biomasy glonów. Sialve i in. [113] stwierdzili, że zastosowanie procesu fermentacji metanowej prowadzonej w odpowiednich warunkach technologicznych jako pierwotnego sposobu przetworzenia biomasy glonów warunkuje wyższy efekt ekonomiczny w stosunku do zintegrowanego systemu ekstrakcji lipidów i beztlenowego przetworzenia pozostałości poekstrakcyjnych. Inne rezultaty sugerują, iż bilans operacji jednostkowych prowadzonych w procesie fermentacji metanowej jest najefektywniejszy zarówno pod kątem analizy ekonomicznej, jak również emisji zanieczyszczeń do komponentów środowiska

naturalnego [10]. Wyniki badań udowadniają, iż fermentacja metanowa może być najbardziej praktycznym sposobem konwersji biomasy glonów w energię. Jednakże Börjesson i Berglund [5] zauważyli, że nakłady energetyczne i skutki dla środowiska są bardzo zróżnicowane w zależności od stosowanego rozwiązania technologicznego procesu fermentacji metanowej. Dlatego dla pełnej i obiektywnej oceny konieczne jest przeprowadzanie w każdym przypadku środowiskowej oceny cyklu życia (LCA).

## 2. Cele i zakres badań

Celem prowadzonych badań było określenie możliwości separacji i zagęszczenia biomasy mikroglonów występujących w zeutrofizowanych zbiornikach wodnych, na przykładzie Zalewu Wiślanego, z wykorzystaniem instalacji pracującej w skali ułamkowo-technicznej. Zmierzano również do zweryfikowania możliwości wykorzystania tego rodzaju pozyskiwanej biomasy glonów jako substratu wykorzystywanego do produkcji biogazu lub kosubstratu w procesie fermentacji metanowej prowadzonej z typowymi, energetycznymi roślinami energetycznymi, na przykładzie sianokiszonki.

Celem pracy była również analiza możliwości pozyskania roślinności wodnej w wyniku okresowego wykaszania brzegów zbiorników wodnych oraz oczyszczania dna pod kątem jej wykorzystania w procesach produkcji biogazu. W prezentowanych pracach określono efektywność wytwarzania gazu fermentacyjnego podczas wykorzystania jako substratu roślin wodnych i wodno-błotnych.

Zakres badań obejmował:

- określenie efektywności technologicznej prototypowej instalacji służącej do pozyskiwania biomasy mikroglonów z naturalnych zbiorników wodnych;
- określenie struktury ilościowej i taksonomicznej biomasy mikroglonów pozyskiwanych z wód Zalewu Wiślanego;
- przeprowadzenie badań respirometrycznych nad fermentacją biomasy mikroglonów pozyskanych w różnych miesiącach okresu wegetacyjnego;
- określenie możliwości oraz efektywności technologicznej kofermentacji biomasy mikroglonów i sianokiszonki w różnych stosunkach wagowych tego rodzaju substratów organicznych;
- określenie wpływu zastosowania hydrotermalnej depolimeryzacji oraz odmiennych dawek kompleksu enzymatycznego na charakterystykę biomasy makroglonów stosowanych w procesach fermentacji metanowej oraz ilość i skład gazowych produktów metabolizmu bakterii beztlenowych;
- analizę ilościową pozyskiwanej biomasy roślinności wodnej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego;

- określenie efektywności procesu fermentacji metanowej wybranych taksonów roślinności wodnej pozyskiwanej podczas zabiegów melioracyjnych;
- ocenę efektywności energetycznej przetworzonej w biogaz biomasy wodnej pozyskanej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego.

### **3. Metodyka badań**

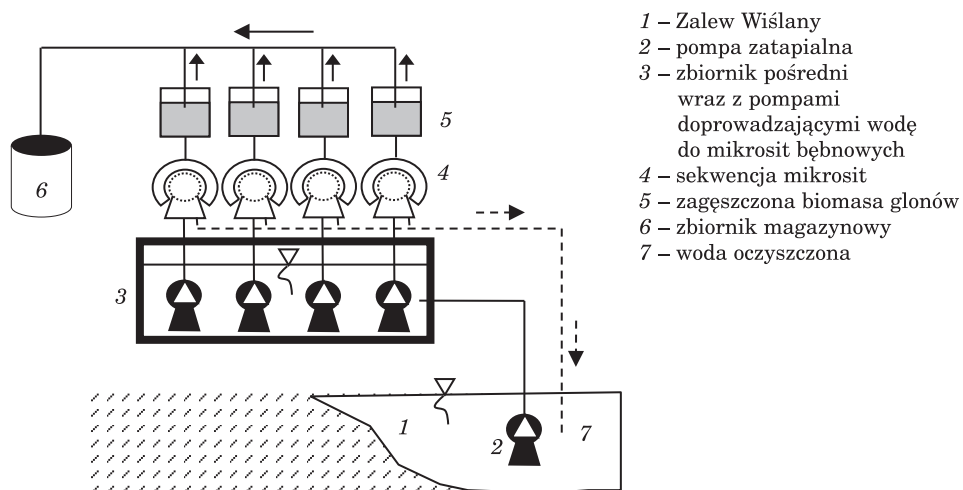
#### **3.1. Eksperyment I**

Badania nad możliwością pozyskiwania biomasy mikroglonów z zastosowaniem prototypowej instalacji pracującej w skali ułamkowo-technicznej przeprowadzono w okresie od 1.06.2011 do 30.09.2011. Stacja pilotująca zlokalizowana została we Fromborku nad Zalewem Wiślanym. Eksploatacja instalacji, która prowadziła do separacji i zagęszczenia biomasy glonów z akwenu, prowadzona była w następujących wariantach technologicznych:

- wariant I – wykorzystanie filtra bębnowego o średnicy oczek 40  $\mu\text{m}$ ,
- wariant II – wykorzystanie filtra bębnowego o średnicy oczek 30  $\mu\text{m}$ ,
- wariant III – wykorzystanie filtra bębnowego o średnicy oczek 20  $\mu\text{m}$ ,
- wariant IV – wykorzystanie filtra bębnowego o średnicy oczek 10  $\mu\text{m}$ ,

Eksploatowana instalacja zbudowana była z następujących zasadniczych elementów i urządzeń (rys. 1). Woda z Zalewu Wiślanego pompowana była pompą zatapialną z wydajnością 40  $\text{m}^3/\text{h}$  do zbiornika retencyjnego objętości 2  $\text{m}^3$ . W zbiorniku retencyjnym umieszczone były cztery pompy zatapialne o wydajności 10  $\text{m}^3/\text{h}$  podające wodę na układ mikrosit bębnowych o średnicy oczek w zakresie od 10  $\mu\text{m}$  do 40  $\mu\text{m}$  oraz średnicy bębna 0,5 m. Na filtrach następowało ostateczne zagęszczenie i wydzielenie biomasy mikroglonów oraz odprowadzenie oczyszczonej wody do odbiornika. Separowana biomasa glonów kierowana była do zbiorników magazynowych o objętości czynnej 3  $\text{m}^3$ .

Zastosowane w eksperymencie mikrosita bębnowe zasilane były wodą z biomasą glonową króćcem wlotowym z zintegrowanych z sitem zbiorników pośrednich. Dzięki zastosowaniu pośredniego zbiornika z deflektorem, medium wytracało swą energię, a obciążenie części separującej było równomierne. Część separującą sita stanowiła siatka przymocowana do bębna napędzanego przez motoreduktor. Glony zatrzymywane były na perforacji, natomiast oczyszczane medium zawracano do Zalewu Wiślanego. Oczyszczanie przegrody filtracyjnej następowało poprzez system płuczający, który stanowiły dysze rozbryzgowce. Dysze zasilane były wodą oczyszczoną odprowadzaną do odbiornika poprzez zastosowanie pomp obiegowych. Praca filtrów odbywała się w sposób całkowicie zautomatyzowany, a rozpoczęcie płukania następowało w momencie zwiększenia oporów przepływu wody przez przegrodę filtracyjną i podniesienia



Rys. 1. Schemat instalacji do pozyskiwania biomasy mikroglonów z naturalnych akwenów wodnych wykorzystywanej w badaniach

się jej poziomu określonego przez czujkę poziomu. Popłuczyny były separowane i odprowadzane poza układ technologiczny. Charakterystykę biomasy mikroglonów pozyskanych z wód Zalewu Wiślanego stosowaną w badaniach respirometrycznych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3  
 Charakterystyka fizykochemiczna biomasy mikroglonów pozyskiwanych z wód Zalewu Wiślanego

Wskaźnik	Jednostka	Wartość	
		średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	8,05	0,94
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	89,27	1,50
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	10,73	1,50
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	66,06	6,15
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	7,02	1,09
TC	[mg/g s.m.]	469,11	5,40
TOC	[mg/g s.m.]	436,41	9,10
Stosunek C:N	-	7,10	0,59
pH	-	7,19	0,56
Białko	[% s.m.]	41,29	3,84
Tłuszcze	[% s.m.]	13,62	2,20
Cukry	[% s.m.]	21,92	2,07

W początkowej fazie prowadzonych eksperymentów, na etapie rozruchu technologicznego, urządzenia były obsługiwane przez zespół odpowiedzialny za realizację projektu, a następnie przez służby Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. we Fromborku zgodnie z założeniami i wytycznymi określonymi przez zespół Katedry Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Przed wykorzystaniem pozyskanej biomasy glonów jako substratu w procesach fermentacji metanowej prowadzonej w reaktorach respirometrycznych oraz komorach o pracy ciągłej materiał był zagęszczany z wykorzystaniem wirówki laboratoryjnej do poziomu około 8% suchej masy.

Badania nad efektywnością procesu fermentacji pozyskanej biomasy mikroglonów przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. W eksperymentach wykorzystano zestawy respirometryczne typu Oxi-Top Control firmy WTW. Reaktory modelowe składały się z komór reakcyjnych o objętości czynnej 0,5 dm<sup>3</sup> połączonych szczelnie z urządzeniami pomiarowo-rejestrującymi. Urządzenia rejestrowały zmiany ciśnienia parcjalnego w komorze pomiarowej wywołanego produkcją biogazu oraz zmiany pH w fazie ciekłej.

Przeprowadzone eksperymenty podzielono na trzy warianty technologiczne. Kryterium podziału było zastosowane obciążenie modelowych komór fermentacyjnych ładunkiem suchej masy organicznej. W wariacie pierwszym respirometry eksploatowano przy początkowym obciążeniu wynoszącym 2 g s.m.o./dm<sup>3</sup>, w wariacie drugim 3 g s.m.o./dm<sup>3</sup>, w wariacie trzecim 4 g s.m.o./dm<sup>3</sup> i w wariacie czwartym 5 g s.m.o./dm<sup>3</sup>. W każdym z prowadzonych wariantów eksperymentu do komór reakcyjnych wprowadzano 200 cm<sup>3</sup> osadu beztlenowego, a następnie dozowano założone ilości przygotowanej biomasy glonów. Organizację badań respirometrycznych oraz ilości wprowadzanej biomasy glonów zaprezentowano w tabeli 4.

Osad beztlenowy, stanowiący inokulum stosowanych w eksperymentach rektorów respirometrycznych, pochodził z komór fermentacyjnych eksploatowanych w sposób ciągły, zasilanych biomasą uprawnych roślin energetycz-

Tabela 4

Parametry badań respirometrycznych

Wariant	Objętość komory [dm <sup>3</sup> ]	Obciążenie ładunkiem s.m.o. [g s.m.o./dm]	Objętość osadu beztlenowego [dm <sup>3</sup> ]	Sucha masa organiczna biomasy glonów [g]	Sucha masa biomasy glonów [g]	Świeża masa biomasy glonów [g]	HRT [d]
I	0,5	2,0	0,2	0,4	0,45	5,68	20
II		3,0		0,6	0,68	8,52	
III		4,0		0,8	0,91	11,36	
IV		5,0		1,0	1,14	14,20	



nych, w tym kiszonką kukurydzy oraz sianokiszonką. Obciążenie stosowanego osadu beztlenowego ładunkiem związków wynosiło  $2,4 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$ , temperatura prowadzenia procesu  $35^\circ\text{C}$ , hydrauliczny czas zatrzymania 40 d. Charakterystykę osadu beztlenowego stosowanego w pomiarach respirometrycznych zaprezentowano w tabeli 5.

Tabela 5  
Charakterystyka fizykochemiczna osadu beztlenowego stosowanego w eksperymencie

Wskaźnik	Jednostka	Wartość	
		średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	5,73	1,04
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	71,19	1,73
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	28,81	1,73
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	37,14	3,92
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	2,58	0,94
TC	[mg/g s.m.]	373,9	16,04
TOC	[mg/g s.m.]	290,8	14,77
Stosunek C:N	-	7,83	0,42
pH	-	7,09	0,17
Białko	[% s.m.]	23,21	2,45
Tłuszcze	[% s.m.]	2,18	0,48
Cukry	[% s.m.]	0,73	0,07

W celu usunięcia powietrza i zapewnienia warunków beztlenowych wewnątrz eksploatowanych komór fermentacyjnych przed rozpoczęciem pomiaru całą zawartość reaktora przedmuchiwno azotem przez okres 5 min, a następnie szczelnie zakręcano. Kompletny zestaw pomiarowy umieszczono w szafie termostatującej o histerezie nie przekraczającej  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . Pomiaru prowadzono w temperaturze  $35^\circ\text{C}$ . Czas pomiaru wynosił 20 dób, wartości ciśnienia w komorze reakcyjnej były rejestrowane co 24 h.

Dwa dni przed końcem pomiaru do komory reakcyjnej wprowadzono 30% zasadę sodową (NaOH). Pozwoliło to na wytrącenie z fazy gazowej dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ). Spadek ciśnienia w komorze reakcyjnej odpowiadał zawartości dwutlenku węgla, natomiast za pozostałą wysokość ciśnienia odpowiadała zawartość metanu. Zawartość reaktorów była mieszana z wykorzystaniem mieszadeł magnetycznych.

Podstawą obliczeń w badaniach respirometrycznych jest równanie gazu doskonałego:

$$n = \frac{p \times V}{R \times T}$$

gdzie:

$n$  – ilość moli gazu [mol]

$p$  – ciśnienie gazu [Pa]

$V$  – objętość gazu [m<sup>3</sup>]

$R$  – uniwersalna stała gazowa [8,314 J/mol · K]

$T$  – temperatura [K]

Zawartość węgla w fazie gazowej:

$$n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CH}_2} = \frac{p_1 \times V_g}{R \times T}$$

gdzie:

$n_{\text{CO}_2} + n_{\text{CH}_4}$  – ilość wytworzonych moli dwutlenku węgla i metanu [mol]

$p_1$  – różnica ciśnienia gazu w naczyniu badawczym na początku i na końcu doświadczenia, spowodowana zużywaniem tlenu i absorpcją powstającego CO<sub>2</sub> [hPa]

$V$  – objętość fazy gazowej w komorze pomiarowej [ml]

$R$  – stała gazowa [8,314 J/mol · K]

$T$  – temperatura inkubacji [K]

10<sup>-4</sup> – współczynnik przeliczeniowy Pa na hPa oraz m<sup>3</sup> na cm<sup>3</sup>

Zawartość dwutlenku węgla w fazie gazowej:

$$n_{\text{CO}_2} = \left( \frac{p_1 \times V_g - p_2 \times (V_g - V_{\text{KOH}})}{R \times T} \right) \times 10^{-4}$$

gdzie:

$n_{\text{CO}_2}$  – ilość wytworzonych moli dwutlenku węgla [mol]

$p_2$  – różnica ciśnienia gazu w odpowiednim naczyniu badawczym na końcu doświadczenia minus ciśnienie na początku doświadczenia minus ciśnienie w próbie ślepej po dodaniu roztworu KOH [hPa]

$V_{\text{KOH}}$  – objętość roztworu KOH [ml]

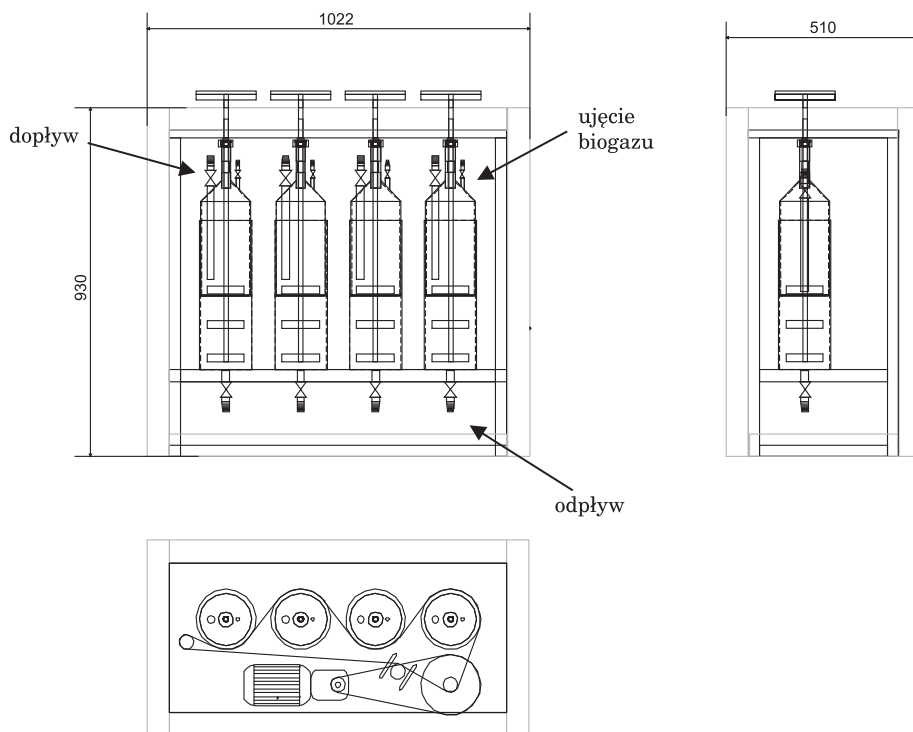
Zawartość metanu w fazie gazowej:

$$n_{\text{CH}_4} = n_{\text{CO}_2 + \text{CH}_4} - n_{\text{CO}_2}$$

### 3.2. Eksperyment II

Ze względu na to, iż pozyskiwanie biomasy glonów z naturalnych zbiorników wodnych może być rozpatrywane jako potencjalne źródło substratu organicznego jedynie w okresie ich intensywnych zakwitów oraz fakt, iż ilość biomasy roślinności wodnej nie zawsze zrównoważy potrzeby systemów biogazowych, materię tego rodzaju należy traktować jako jeden ze składników kompozycji substratowej. Celem eksperymentów prowadzonych z wykorzystaniem reaktorów pracujących w trybie ciągłym było określenie wpływu mikroglonów na przebieg procesu fermentacji typowego substratu roślinnego stosowanego w biogazowniach rolniczych, a mianowicie sianokiszonki.

Badania nad efektywnością procesu kofermentacji biomasy mikroglonów z sianokiszonką realizowano w warunkach laboratoryjnych w reaktorach beztlenowych pracujących w trybie ciągłym. W eksperymencie zastosowano reaktory beztlenowe z pełnym wymieszaniem o objętości czynnej 4 dm<sup>3</sup> (objętość całkowita 5 dm<sup>3</sup>). Wyściwiowa koncentracja osadu beztlenowego w eksploatowanych komorach beztlenowych utrzymywana była na poziomie



Rys. 2. Schemat instalacji badawczej wykorzystywanej do badań w warunkach dynamicznych

około  $4 \text{ g s.m.} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Reaktory umieszczone były w termoizolowanej komorze wyposażonej w system ogrzewania wraz z układem cyrkulacyjnym ciepłego powietrza (rys. 2).

Reaktory wyposażone zostały w czujki temperatury, system mieszania, układ zasilający reaktory substratem i odprowadzający produkty procesu, system pomiaru ilości i analizy biogazu. Zgodnie z założeniami badania przeprowadzono w temperaturze  $35^\circ\text{C}$ . Uruchomienie grzałek sterowane było poprzez sterownik termiczny, który reagował bezpośrednio na wskazania czujek temperaturowych zlokalizowanych wewnątrz eksploatowanego reaktora modelowego. Przyjęto histerezę  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Hydrauliczny czas zatrzymania substratu w reaktorze we wszystkich wariantach eksperymentu wynosił 40 dób. Zastosowane obciążenie ładunkiem związków organicznych kształtowało się w na poziomie  $2 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$ . Raz w ciągu doby odbierany był substrat przefermentowany w ilości  $100 \text{ cm}^3$ , który poddawano analizom. Z tą samą częstotliwością do układu technologicznego wprowadzano testowany substrat organiczny w ilości  $100 \text{ cm}^3/\text{d}$ .

Osad beztlenowy stanowiący inokulum eksploatowanych w eksperymentach reaktorów pochodził z zamkniętych komór fermentacyjnych Miejskiej Oczyszczalni Ścieków „Łyna” w Olsztynie. Układ technologiczny reaktorów beztlenowych eksploatowanych na oczyszczalni oparty jest na zastosowaniu nadmiernego osadu czynnego, obciążenie ładunkiem związków organicznych wynosi około  $2 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$ , temperatura prowadzenia procesu  $35^\circ\text{C}$ , hydrauliczny czas zatrzymania 20 d. Charakterystykę osadu beztlenowego stosowanego w opisywanych badaniach zaprezentowano w tabeli 6.

Tabela 6

Charakterystyka fizykochemiczna osadu beztlenowego stosowanego w eksperymencie

Wskaźnik	Jednostka	Wartość	
		średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	3,81	0,21
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	68,46	2,53
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	31,54	2,53
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	33,08	3,35
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	1,66	0,23
TC	[mg/g s.m.]	309,05	28,37
TOC	[mg/g s.m.]	199,42	34,29
Stosunek C:N	-	9,34	0,08
pH	-	7,21	0,32
Białko	[% s.m.]	20,67	2,77
Tłuszcze	[% s.m.]	3,12	0,51
Cukry	[% s.m.]	1,57	0,36

W badaniach prowadzonych w reaktorach o pracy ciągłej analizowano efektywność technologiczną procesu fermentacji metanowej substratu organicznego opartego na kompozycji zawierającej biomasę glonów oraz biomasę sianokiszonki. Zastosowanie tego rodzaju zabiegu technologicznego miało na celu poprawienie parametrów technologicznych testowanego substratu organicznego, głównie pod kątem zmiany stosunku C:N. W pracach badawczych analizowano wpływ zastosowanego procentowego stosunku ilości suchej masy organicznej biomasy glonów do suchej masy organicznej stosowanej kiszonki w substracie na uzyskiwaną ilość i skład jakościowy biogazu.

Zabieg technologiczny oparty na testowaniu odmiennych proporcji testowanych substratów organicznych pozwolił na podzielenie prowadzonych doświadczeń na następujące warianty:

- wariant I – 100% s.m.o. biomasy glonów/0% s.m.o. biomasy sianokiszonki (100/0)
- wariant II – 80% s.m.o. biomasy glonów/20% s.m.o. biomasy sianokiszonki (80/20)
- wariant III – 60% s.m.o. biomasy glonów/40% s.m.o. biomasy sianokiszonki (60/40)
- wariant IV – 40% s.m.o. biomasy glonów/60% s.m.o. biomasy sianokiszonki (40/60)
- wariant V – 20% s.m.o. biomasy glonów/80% s.m.o. biomasy sianokiszonki (20/100)
- wariant VI – 0% s.m.o. biomasy glonów/100% s.m.o. biomasy sianokiszonki (0/100)

Tabela 7

Charakterystyka fizykochemiczna sianokiszonki stosowanej podczas eksperymentów

Wskaźnik	Jednostka	Wartość	
		średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	49,82	4,26
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	91,62	1,39
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	8,38	1,39
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	28,91	3,06
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	3,19	0,47
TC	[mg/g s.m.]	439,46	21,61
TOC	[mg/g s.m.]	397,72	11,83
Stosunek C:N	–	13,76	0,79
pH	–	5,32	0,11
Białko	[% s.m.]	18,27	1,73
Tłuszcze	[% s.m.]	3,02	0,21
Cukry	[% s.m.]	60,38	5,28

Sianokiszonka stosowana w eksperymencie pochodziła ze Stacji Dydaktyczno-Badawczej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie zlokalizowanej w miejscowości Bałdy. Charakterystykę tego substratu organicznego zaprezentowano w tabeli 7.

Biomasa glonów wykorzystywana w procesach fermentacji prowadzonych w reaktorach o pracy ciągłej pochodziła z Zalewu Wiślanego. Biomasa pozyskiwana była wstępnie za pomocą opisanego powyżej systemu opartego na mikrositach bębnowych. Charakterystyka biomasy mikroglonów stosowanych w badaniach dynamicznych została zaprezentowana w tabeli 14. Organizację prac badawczych nad fermentacją i kofermentacją biomasy glonów oraz kompozycji substratowej opartej na biomase glonów i sianokiszonce zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8

Organizacja badań prowadzonych w trakcie eksperymentu

Wariant	$V_k$ [dm <sup>3</sup> ]	A [g s.m.o./dm <sup>3</sup> ·d]	Świeża masa glonów [g/d]	Świeża masa sianokiszonki [g/d]	Uwodnienie początkowe mieszaniny [%]	Objętość substratów po uwodnieniu [cm <sup>3</sup> ]	Uwodnienie końcowe mieszaniny [%]	s.m.o. [% s.m.]	HRT [d]	$T_{tr}$ eksperymentu [d]
100/0	4	2,0	111,32	0	91,95	100	91,95	89,27	40	80
80/20	4	2,0	89,06	3,54	90,35	100	91,74	89,74	40	80
60/40	4	2,0	66,79	7,01	87,98	100	91,00	90,21	40	80
40/60	4	2,0	44,53	10,52	83,97	100	91,15	90,68	40	80
20/80	4	2,0	22,26	14,01	75,81	100	91,25	91,15	40	80
0/100	4	2,0	0	17,42	50,18	100	91,45	91,62	40	80

### 3.3. Eksperyment III

W trakcie realizacji projektu prowadzono również prace badawcze zmierzające do określenia metod wstępnego przygotowania biomasy roślinności wodnej przed procesem fermentacji metanowej w celu uzyskania najwyższych efektów technologicznych. Jedną z testowanych rozwiązań było zastosowanie procesu hydrotermalnej depolimeryzacji wspomaganą wprowadzeniem do układu kompleksu enzymatycznego wspomagającego wstępną, hydrolityczną fazę rozkładu złożonych związków organicznych zawartych w testowanej biomase.

Materiałem użytym w doświadczeniu były glony należące do grupy brunatnic i zielenic pozyskane w okresie letnim z wód Zalewu Wiślanego. Wśród nich

najliczniejszą grupę stanowiły nitkowate brunatnice z rodzaju *Pilayella* (90% udział) oraz *Ectocarpus* (8% udział), nielicznie występowały także zieleńce z rodzaju *Enteromorpha*. Niezależnie od części eksperymentu rozdrobniony mechanicznie z wykorzystaniem urządzenia rozdrabniającego Robot Coupe Blixer 3 materiał roślinny poddawano wstępnej hydrotermalnej depolimeryzacji. Proces ten przeprowadzono w reaktorze ciśnieniowym o objętości czynnej 2,3 dm<sup>3</sup>. Do reaktora wprowadzano 300 g biomasy glonów o uwodnieniu 67% i zawartości substancji organicznych na poziomie 24% w świeżej masie. Reaktor wraz z materiałem roślinnym inkubowano w temperaturze 200°C i pod ciśnieniem 17 Ba przez okres 120 minut w piecu muflowym.

W dalszej części eksperymentu przetworzoną biomasę glonów wprowadzano do reaktorów otwartych o objętości czynnej 0,5 dm<sup>3</sup> wyposażonych w system mieszania, a następnie dozowano mutikompleks enzymatyczny Celluclast 1.5 L, Novozym 188 i Hemicellulase. W celu uzyskania optimum aktywności stosowanych enzymów przed wprowadzeniem ich do przetworzonej hydrotermalnie biomasy glonów uwadniano je do poziomu 98% i obniżano wartość odczynu do wartości 5,23 pH. Reaktory hydrolizy enzymatycznej umieszczone zostały następnie umieszczone w temperaturze 20°C i były inkubowane przez okres 24 h. Doświadczenie zostało podzielone na trzy warianty. Kryterium podziału stanowiły dawki enzymów dozowane do układu technologicznego (tabela 9).

Tabela 9

Stosowane dawki enzymów w poszczególnych wariantach eksperymentu

Nazwa enzymu	Deklarowana aktywność [U/g]	Deklarowana aktywność [U/g s.m.]	Dawka enzymu [g/g s.m.]		
			wariant I	wariant II	wariant III
Celluclast 1,5 L	700	30	$6,54 \times 10^{-3}$	$13,09 \times 10^{-3}$	$26,18 \times 10^{-3}$
Novozym 188	250	25	$9,52 \times 10^{-3}$	$19,05 \times 10^{-3}$	$38,1 \times 10^{-3}$
Hemicellulase	1500	30	$3,27 \times 10^{-3}$	$6,55 \times 10^{-3}$	$13,1 \times 10^{-3}$
Łączna dawka enzymów			$19,35 \times 10^{-3}$	$38,7 \times 10^{-3}$	$77,4 \times 10^{-3}$

Po procesie inkubacji mieszaniny substratu roślinnego oraz określonej dawki enzymów przeprowadzono proces fermentacji metanowej. W tym celu substrat wprowadzono do komór reakcyjnych z osadem beztlenowym o objętości czynnej 0,5 dm<sup>3</sup>. Charakterystykę osadu beztlenowego stosowanego w eksperymencie przedstawia tabela 10.

Zastosowano następujące parametry technologiczne procesu fermentacji metanowej: obciążenie na poziomie 1,0 g s.m.o./dm<sup>3</sup> · d, temperatura 35°C. Na początku cyklu doświadczalnego, w celu wpracowania osadu beztlenowego,

Tabela 10

Charakterystyka osadu beztlenowego wykorzystanego w doświadczeniu

Parametr	Jednostka	Wartość min.	Wartość max.	Średnia	Odchylenie standardowe
pH	–	7,16	7,43	7,3	0,14
Uwodnienie	[%]	98,4	98,7	98,6	0,15
Sucha masa	[%]	1,3	1,6	1,5	0,15
Substancje organiczne	[% s. m.]	49,13	51,96	50,5	1,42
Substancje mineralne	[% s. m.]	48,04	50,87	49,5	1,41
CSK (czas ssania kapilarnego)	[s]	579	611	595	16,0

do modelowych komór fermentacyjnych wprowadzono 25% całkowitego ładunku testowanej biomasy glonów. Pozostałą część substratu wprowadzono piętego dnia trwania inkubacji.

W celu zapewnienia warunków beztlenowych przed rozpoczęciem procesu fermentacji dokonano odtlenienia całej objętości reaktora poprzez przedmuchanie azotem. Komory reakcyjne zaopatrzone były w system odprowadzania i gromadzenia biogazu oraz układ wprowadzania substratu. Pełne wymieszanie zapewniono dzięki zastosowaniu wytrząsarki laboratoryjnej, która pracowała z intensywnością 100 obr./min. Stabilność termiczną na poziomie 35°C uzyskano dzięki umieszczeniu układu reaktorów w szafie termostatującej.

### 3.4. Metody analityczne

Identyfikację taksonomiczną fitoplanktonu dokonywano na podstawie preparatów nietrwałych lub półtrwałych. Analizę jakościową i ilościową fitoplanktonu wykonywano stosując mikroskopowe powiększenia:  $1,25 \times 10 \times 40$  lub  $1,25 \times 10 \times 100$ . Do identyfikacji taksonomicznej wykorzystano następujące opracowania [2, 3, 4, 31, 32, 33, 34, 54, 55, 56, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 89, 98, 99, 114, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 136, 137, 138, 139, 140].

Analizę ilościową fitoplanktonu wykonywano zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Starmacha [118, 126] z prób pobranych z toni wodnej lub fotobioreaktorów. Próbkę po utrwaleniu 4% roztworem formaliny z dodatkiem alkoholu etylowego zagęszczano (metodą sedymentacji) do objętości pozwalającej przy powiększeniu  $500 \times$  oznaczyć w jednym polu widzenia mikroskopu co najmniej 10 i nie więcej niż 25–30 okazów glonów fitoplanktonowych. Oznaczanymi jednostkami były komórki, cenobia, kolonie i nici lub inne formy glonów liczone metodą kropelkową w trzech powtórzeniach. Wynik przeliczano na ilość organizmów występujących w 1 litrze wody. Biomasa fitoplanktonu



szacowano metodą pomiaru objętości komórek [48, 76, 58, 53, 126]. Głony mierzono w każdej próbie osobno w dziesięciokrotnych powtórzeniach. Biomasaę wyliczano z iloczynu liczebności i średniej objętości badanego taksonu oraz masy właściwej glonów równej  $1 \text{ g/cm}^3$ . Koncentrację suchej masy biomasy glonów prowadzono również metodą wagową bezpośrednią wg PN-EN 872:2002.

Pozyskiwanie oraz badania struktury taksonomicznej biomasy makroglonów prowadzone były przez pracowników Instytutu Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopotcie. Badania makrofitów wykonano zgodnie z zaleceniami metodycznymi zawartymi w *Przewodnikach metodycznych do badań terenowych i analiz laboratoryjnych elementów biologicznych wód przejściowych i przybrzeżnych* [69]. Oszacowano procentowy udział poszczególnych komponentów w biomacie.

W eksperymentach przeprowadzono analizy jakościowe testowanego substratu, osadu stanowiącego inokulum eksploatowanych komór fermentacyjnych oraz osadów pofermentacyjnych. Zakres prowadzonych analiz obejmował oznaczenie zawartości suchej masy (s.m.), zawartości suchej masy organicznej (s.m.o.), zawartości suchej masy mineralnej (s.m.m.) zawartości azotu całkowitego ( $N_{\text{całk.}}$ ), zawartości węgla całkowitego (TC), zawartości węgla organicznego (TOC), zawartości fosforu ogólnego ( $P_{\text{og.}}$ ), zawartości białka ogólnego w biomacie ( $B_{\text{og.}}$ ), zawartości tłuszczów w biomacie ( $T_{\text{og.}}$ ), zawartości cukrów redukujących w biomacie ( $C_{\text{og.}}$ ) oraz pH.

Zawartość suchej masy, suchej masy organicznej i mineralnej przeprowadzono metodą grawimetryczną. W wysuszonych w  $105^\circ\text{C}$  próbkach biomasy oznaczono zawartość TC, węgla organicznego TOC oraz  $N_{\text{całk.}}$ . Do analiz wykorzystano analizator cząstek elementarnych Flesh 2000 firmy Thermo. Oznaczenie  $P_{\text{og.}}$  przeprowadzono metodą kolorymetryczną z metawanadanem (V) amonu i molibdenianem amonu po wcześniejszej mineralizacji próbki w mieszaninie kwasu siarkowego (VI) i chlorowego (VII) przy długości fali 390 nm z wykorzystaniem spektrofotometru DR 2800 HACH Lange. Zawartość białka ogólnego szacowano, mnożąc wartość  $N_{\text{całk.}}$  przez współczynnik przeliczeniowy na białko, który wynosi 6,25. Zawartość cukrów redukujących oznaczano metodą kolorymetryczną z odczynnikami antronowymi przy długości fali 600 nm z wykorzystaniem spektrofotometru DR 2800 HACH Lange. Koncentrację tłuszczów oznaczano metodą Soxhleta z wykorzystaniem aparatu do ekstrakcji firmy Buchi. Parametr pH określano poprzez odważenie 10 g zhomogenizowanej powietrznie suchej próby w zlewce o pojemności 100 ml, dodanie 50 ml wody destylowanej i wymieszaniu, a następnie po wycechowaniu aparatu wykonywano pomiar pH w próbce.

Chwilowy oraz całkowity przepływ biogazu mierzono w trybie ciągłym za pomocą przepływomierza firmy Allborg SS-Body. Jednocześnie raz na dobę za

pomocą analizatora GMF 430 firmy Gas Data oraz chromatografu gazowego GC Agilent 7890 A dokonywano pomiarów składu jakościowego biogazu. Doprowadzenie i odprowadzenie substratu znajdowało się stale poniżej poziomu osadu w reaktorze, tak aby nie dochodziło do wprowadzania do wnętrza reaktora przypadkowego powietrza. Dodatkowo w tym celu dopływ wyposażono w śluzę.

Analizę statystyczną uzyskanych wyników wykonano w oparciu o pakiet STATISTICA 10.0 PL. Weryfikację hipotezy dotyczącej rozkładu każdej badanej zmiennej określono na podstawie testu W Shapiro-Wilka. W celu stwierdzenia istotności różnic między zmiennymi przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji (ANOVA). Sprawdzenia jednorodności wariancji w grupach dokonano z wykorzystaniem testu Levene'a. W celu określenia istotności różnic między analizowanymi zmiennymi przeprowadzono test RIR Tukeya. W testach przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ .

## **4. Omówienie wyników badań**

### **4.1. Eksperyment I**

#### **4.1.1. Efektywność pracy instalacji do pozyskiwania biomasy glonów**

Przeprowadzone badania pozwoliły określić potencjał oraz możliwość pozyskiwania biomasy wodnej z Zalewu Wiślanego w skali ułamkowo-technicznej. Akwen w tej części charakteryzuje się niewielką głębokością, wynoszącą średnio 1,5 m. Z tego względu istnieją tu doskonałe warunki do rozwoju fitoplanktonu, jak również wynurzonej i zanurzonej roślinności naczyniowej. Woda w analizowanym zbiorniku ulega ciągłemu mieszaniu, co powoduje stałe wynoszenie substancji pokarmowych do warstwy fotogenicznej. Wysoka koncentracja związków biogennych oraz dostęp światła w całej objętości toni wodnej powoduje intensywne zakwity i bujny rozwój możliwej do pozyskania biomasy roślinności wodnej od wiosny do późnej jesieni. W rejonie prowadzonych badań obserwuje się rozwój litoralu w postaci coraz szerszego pasa trzcinowisk, który ogranicza możliwość rekreacyjnego korzystania z wód. Z uwagi na częste i intensywne zakwity kąpielisko miejskie jest zamknięte, jest to szczególnie uciążliwe w okresie turystycznym. Ze względu na prezentowane powyżej warunki morfometryczne, hydrologiczne, troficzne i biologiczne do testów stacji pilotującej do pozyskiwania biomasy roślinności wodnej pracującej w skali ułamkowo-technicznej wybrano Zalew Wiślany.

W trakcie prowadzenia eksperymentów stwierdzono, iż ilość pozyskiwanej biomasy jest bardzo wysoka i istotnie przekracza wartości, które powinny wynikać z koncentracji fitoplanktonu. Badania jakościowe i ilościowe populacji biomasy mikroglonów prowadzone w latach 2009–2010 udowodniły, iż maksymalne stężenia fitoplanktonu kształtują się na poziomie 20–30 g/m<sup>3</sup>. Stężenia suchej masy oznaczone podczas eksperymentów przekraczały kilkukrotnie powyższe wartości i mieściły się w zakresie od 144,2 g/m<sup>3</sup> do 151,6 g/m<sup>3</sup> (tabela 11). Zjawisko to wynikało z faktu, iż w pozyskiwanej biomacie oprócz alg występowały znaczne ilości obumarłej materii organicznej pochodzącej głównie z roślin naczyniowych. Lokalizacja punktu poboru wody do eksperymentów bezpośrednio za pasem litoralu spowodowała, iż typowa biomasa glonowa była wzbogacona o dodatkowe źródło substratu organicznego, jakim był detrytus unoszący się w toni wodnej. Z uwagi na niewielką głębokość zbiornika oraz falowanie do układu eksperymentalnego dostawały się również cząstki mineralne, mimo zabezpieczenia układu pompowego. Ilość suchej masy organicznej w separowanym i zagęszczanym substracie mieściła się w zakresie od 75,1 do 82,3%.

Tabela 11  
Charakterystyka biomasy glonów w wodzie pozyskiwanej z Zalewu Wiślanego

Wariant	Wydajność pompy [m <sup>3</sup> /h]	Czas pracy [h]	Woda pobierana z Zalewu Wiślanego			
			objętość wody [m <sup>3</sup> ]	sucha masa [g/m <sup>3</sup> ]	sucha masa organiczna [g/m <sup>3</sup> ]	biomasa całkowita [g/m <sup>3</sup> ]
I	10	8	80	44,2	113,8	11536,0
II	10	8	80	47,9	118,2	11832,0
III	10	8	80	51,6	123,7	12128,0
IV	10	8	80	49,3	118,3	11944,0

Tabela 12  
Charakterystyka biomasy glonów zagęszczonej w procesie mikrofiltracji

Wariant	Wydajność pompy [m <sup>3</sup> /h]	Czas pracy [h]	Zagęszczona biomasa wodna				
			objętość [m <sup>3</sup> ]	sucha masa [g/m <sup>3</sup> ]	sucha masa organiczna [g/m <sup>3</sup> ]	uwodnienie [%]	biomasa całkowita [g/m <sup>3</sup> ]
I	10	8	1,634	6536,0	5870,0	99,60	10679,8
II	10	8	1,231	8740,1	6991,4	99,29	10759,1
III	10	8	0,835	12775,5	11105,4	98,47	10667,5
IV	10	8	0,439	20351,0	16197,6	97,90	8934,1

W układzie technologicznym analizowano filtrację jednostopniową przez przegrody filtracyjne o perforacji w zakresie od 10  $\mu\text{m}$  do 40  $\mu\text{m}$ . Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, iż efektywność zatrzymywania biomasy rośnie proporcjonalnie do zmniejszającej się średnicy porów w bębnie filtracyjnym. W przypadku zastosowania wariantu, w którym testowano efektywność pracy filtra o średnicy porów przegrody filtracyjnej na poziomie 10  $\mu\text{m}$ , koncentracja suchej masy w odpływie do Zalewu Wiślanego kształtowała się na średnim poziomie 8,64  $\text{g/m}^3$  (tabela 13). W przypadku wykorzystania bębna filtracyjnego o średnicy oczek 40  $\mu\text{m}$  wartość tego parametru wynosiła średnio 29,92  $\text{g/m}^3$ . W zależności do zastosowania rozwiązania technologicznego separowana i zagęszczona biomasa wodna charakteryzowała się różnym stopniem uwodnienia, które mieściło się w zakresie od 99,6% w wariancie I do 97,90% podczas doświadczeń prowadzonych w IV wariancie eksperymentu (tabela 12). Na stopień uwodnienia separowanej biomasy bezpośredni wpływ miała średnica oczek materiału filtracyjnego. Zastosowanie oczek o mniejszej średnicy powodowało szybsze zapychanie się przegrody filtracyjnej, co za tym idzie – zwiększenie oporów przepływu i podwyższenie poziomu wody wewnątrz filtra.

Tabela 13  
Charakterystyka odpływu z eksploatowanej instalacji pozyskiwania biomasy glonów

Wariant	Wydajność pompy [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Czas pracy [h]	Odpływ wody do Zalewu Wiślanego				
			objętość wody [ $\text{m}^3$ ]	objętość [ $\text{m}^3$ ]	sucha masa [ $\text{g/m}^3$ ]	sucha masa organiczna [ $\text{g/m}^3$ ]	biomasa całkowita [ $\text{g/m}^3$ ]
I	10	8	80	78,37	0,93	8,64	856,18
II	10	8	80	78,77	3,62	10,77	1072,94
III	10	8	80	79,17	8,45	14,59	1460,46
IV	10	8	80	79,56	7,83	29,92	3009,91

Skutkowało to częstszym płukaniem przegrody filtracyjnej i usuwaniem biomasy poza układ technologiczny. Warianty te pozwalały na skuteczniejszą separację biomasy, jednak była ona w wysokim stopniu uwodniona. Zastosowanie bębna filtracyjnego o porach wynoszących 40  $\mu\text{m}$  zapewniało uzyskanie niższych ilości biomasy całkowitej, chociaż proces separacji zapewniał uzyskanie substratu zawartości około 2,1% suchej masy.

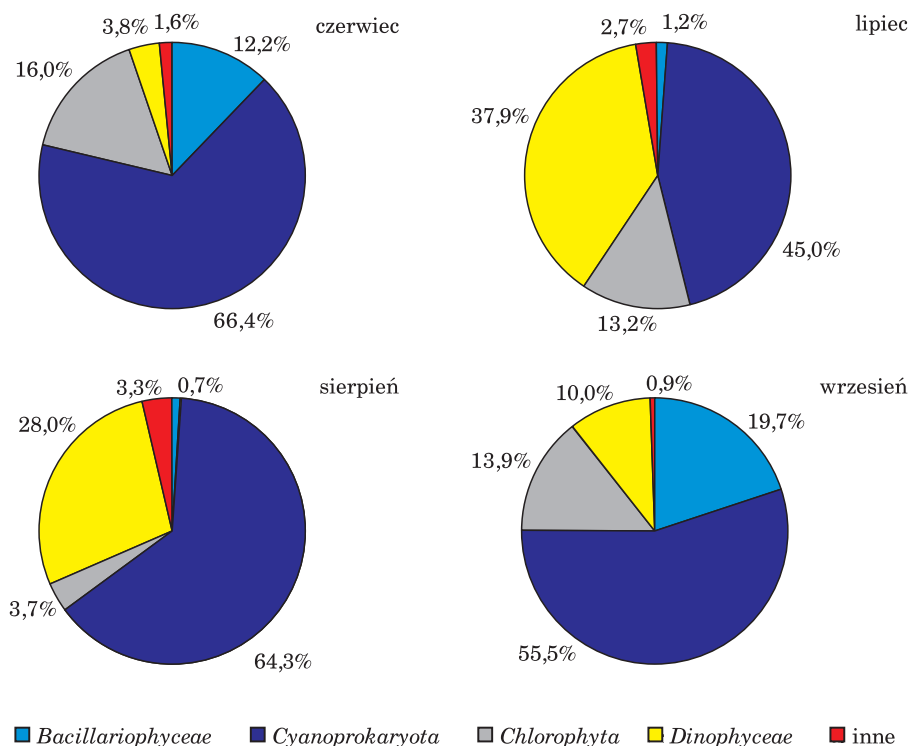
#### 4.1.2. Struktura taksonomiczna biomasy glonów

W czerwcu w biomacie fitoplanktonu Zalewu Wiślanego dominowały *Cyanoprokaryota*. Udział sinic w fitoplanktonie wzrósł do  $66,4 \pm 9,83\%$ . Największy udział w biomacie sinic miała *Woronichinia compacta* oraz *Microcystis sp.* Ilość glonów należących do gromady *Bacillariophyceae* stanowiła w tym okresie  $12,2 \pm 4,12\%$  ogólnej ilości biomasy (rys. 3). Przedstawicielem okrzemek wpływającym istotnie na wielkość ich biomasy była *Fragilaria crotonensis*. Udział *Chlorophyta* kształtował się na poziomie  $16,0 \pm 5,06\%$ . Tworzyły ją w większości gatunki z rodzaju *Pediastrum sp.*, ale towarzyszyły im gatunki *Scenedesmus sp.*, *Crucigenia sp.*, *Oocystis sp.*, *Coelastrum sp.* Udział pozostałych grup taksonomicznych mikroglonów oscylował wokół wartości  $5,4\%$ , przy czym *Dinophyceae* występowały najliczniej, stanowiąc  $3,8 \pm 0,51\%$  biomasy fitoplanktonu (rys. 3).

W lipcu w strukturze fitoplanktonu przeważały *Cyanoprokaryota*. Udział sinic wynosił do  $45,0 \pm 7,73\%$ . Dominujące gatunki *Cyanoprokaryota* należały do rodzaju *Anabaena sp.*, a najliczniej występowała *Anabaena circinalis*. Subdominujący był udział *Microcystis sp.* Rozwijającym się bardzo intensywnie sinicom towarzyszyły w znaczącej ilości *Dinophyceae*, których procentowy udział w biomacie fitoplanktonu kształtował się na wysokim poziomie  $37,9 \pm 3,82\%$ . *Dinophyceae* reprezentowane były przez rodzaj *Gymnodinium sp.* i *Gonyaluaux sp.* Udział *Chlorophyta* to  $13,2 \pm 2,94\%$  wszystkich glonów planktonowych. Pozostałe grupy taksonomiczne stanowiły około  $3,9 \pm 0,98\%$  biomasy mikroglonów (rys. 3).

W sierpniu *Cyanoprokaryota* miały  $64,3 \pm 10,14\%$  udział w ogólnej biomacie fitoplanktonu. Struktura taksonomiczna sinic uległa zmianie. Dominantem było *Microcystis viridis*. Subdominującą grupą w biomacie fitoplanktonu były nadal *Dinophyceae* z udziałem sięgającym  $28,0 \pm 6,66\%$ . Przeważały w niej gatunki z rodzaju *Gymnodinium sp.* Udział *Chlorophyta* w tym okresie sezonu wegetacyjnego wynosił  $3,7 \pm 1,72\%$ . Pozostałe grupy fitoplanktonu występowały w mniejszości, a udział ich biomasy w fitoplanktonie nie przekraczał  $4,0 \pm 2,19\%$  (rys. 3).

We wrześniu biomasa *Cyanoprokaryota* stanowiła  $55,4 \pm 8,49\%$  ogólnej ilości mikroglonów występujących w miejscu poboru prób. Grupą subdominującą w tym okresie były *Bacillariophyceae*, a ich udział to  $19,7 \pm 2,46\%$ . Występujące okrzemki należały do *Centriceae*. *Dinophyceae* stanowiły  $10,0 \pm 4,48\%$  udział w biomacie, natomiast glony gromady *Chlorophyta* występowały w ilości  $13,9 \pm 1,55\%$  biomasy fitoplanktonu (rys. 3). Reprezentowały je gatunki *Scenedesmus sp.*, *Oocystis sp.*, *Pediastrum sp.* i inne z *Chlorococcales*.



Rys. 3. Charakterystyka składu taksonomicznego biomasy fitoplanktonu stosowanego w eksperymencie

#### 4.1.3. Charakterystyka i właściwości biomasy glonów

W okresie czerwiec – wrzesień do modelowych komór fermentacyjnych wprowadzano zagęszczoną biomasę fitoplanktonu, w której dominującą grupą glonów była *Cyanoprokaryota*, z wysokim udziałem *Chlorophyta* oraz *Dinophyceae* (rys. 3). W tej części eksperymentu zawartość substancji węglowych w suchej masie kształtowała się na poziomie  $89,27 \pm 1,50\%$  s.m., średnia wartość TC dla mikroglonów pozyskanych w przedmiotowym okresie sezonu wegetacyjnego wynosiła  $469,10 \pm 5,40$  mg/g s.m., natomiast TOC oscylowała około wartości  $436,14 \pm 9,10$  mg/g s.m. Stwierdzono, iż koncentracja związków biogenych azotu i fosforu w analizowanej biomacie wnosila kolejno  $66,06 \pm 6,15$  mg/g s.m. oraz  $7,02 \pm 1,09$  mg/g s.m. Stosunek C:N kształtował się na średnim poziomie  $7,10 \pm 0,59$ . Ilość białka ogólnego w tym przypadku wynosiła  $41,29 \pm 3,84\%$  s.m., średnia koncentracja tłuszczów  $13,62 \pm 2,20\%$  s.m., natomiast cukrów nieredukujących  $21,92 \pm 2,07\%$  s.m. (tabela 15).

#### 4.1.4. Wyniki badań respirometrycznych

Tabela 14

Wyniki pomiarów respirometrycznych procesu fermentacji metanowej mikroglonów pozyskiwanych z wód Zalewu Wiślanego

Miesiąc	Wariant	Obciążenie [kg s.m.o./m <sup>3</sup> ]	Ilość biogazu [dm <sup>3</sup> /kg s.m.o.]	Ilość biogazu [dm <sup>3</sup> /kg s.m.]	Ilość biogazu [dm <sup>3</sup> /kg ś.m.]	Zawartość CH <sub>4</sub> [%]
Czerwiec	I	2,0	591,3	527,9	42,5	67,4
	II	3,0	582,4	519,9	41,9	62,8
	III	4,0	477,3	426,1	34,3	59,9
	IV	5,0	420,4	375,3	30,2	50,1
Lipiec	I	2,0	603,4	538,7	43,4	68,3
	II	3,0	581,9	519,5	41,8	66,9
	III	4,0	521,6	465,6	37,5	57,2
	IV	5,0	470,2	419,7	33,8	49,5
Sierpień	I	2,0	568,4	507,4	40,8	66,8
	II	3,0	550,1	491,1	39,5	63,5
	III	4,0	483,6	431,7	34,8	55,2
	IV	5,0	437,1	390,2	31,4	47,7
Wrzesień	I	2,0	561,4	501,2	40,3	67,4
	II	3,0	507,4	453,0	36,5	60,9
	III	4,0	464,7	414,8	33,4	52,4
	IV	5,0	446,1	398,2	32,1	49,3

W trakcie prowadzonych badań stwierdzono, iż głównym czynnikiem wpływającym na efektywność procesu fermentacji metanowej pod kątem ilości oraz jakości uzyskiwanego biogazu było zastosowane obciążenie modelowych komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych. Nie zanotowano natomiast istotnego wpływu okresu, w którym pozyskiwano biomasę glonów, na sprawność wytwarzania biogazu. W wariancie, w którym obciążenie reaktorów respirometrycznych kształtowało się na poziomie 2 kg s.m.o./m<sup>3</sup>, całkowita ilość wytworzonych gazowych produktów metabolizmu mieściła się w zakresie od 561,4 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. we wrześniu do 603,4 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. w lipcu. Zawartość metanu w biogazie kształtowała się w wąskich granicach od 66,8% do 68,3%. Zastosowanie obciążenia modelowych komór fermentacyjnych wynoszącego 3 kg s.m.o./dm<sup>3</sup> wpływało bezpośrednio na obniżenie sprawności transformacji biomasy glonów do wysokoenergetycznego biogazu. Stwierdzono, iż w tym wariancie eksperymentu najwyższą jednostkową ilość biogazu uzyskano w czerwcu i lipcu, gdzie notowano kolejno 582,4 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. oraz 581,9 dm<sup>3</sup>/kg s.m.o. (tabela 14).

Istotnie niższe wartości obserwowano podczas fermentacji biomasy pozyskanej w kolejnych miesiącach. Kształtowały się one na poziomie  $550,1 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  w sierpniu i  $507,4 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  Zawartość metanu w wytwarzanym biogazie zawierała się w przedziale od 60,9% we wrześniu do 66,9% w lipcu. Najniższą sprawność procesu fermentacji metanowej obserwowano, gdy testowane obciążenie wynosiło  $5 \text{ kg s.m.o./dm}^3$ . Całkowita ilość biogazu oscylowała w zakresie od  $420,4 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  w czerwcu do  $470,2 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  w lipcu. Stwierdzono, iż koncentracja metanu zawierała się w wąskich granicach od 47,7% do 50,1% (tabela 14).

## **4.2. Eksperyment II**

### **4.2.1. Charakterystyka i właściwości biomasy**

Biomasa glonów stosowana w procesie kofermentacji z sianokiszonką charakteryzowała się składem i właściwościami analogicznymi do prezentowanych w eksperymencie I. Zawartość substancji węglowych w suchej masie sianokiszonki kształtowała się na poziomie  $91,62 \pm 1,39\%$  s.m., średnia wartość TC dla tego rodzaju substratu wynosiła  $439,46 \pm 21,61 \text{ mg/g s.m.}$ , natomiast TOC oscylowała około wartości  $397,72 \pm 11,83 \text{ mg/g s.m.}$  Stwierdzono, iż koncentracja związków azotu i fosforu w sianokiszonce była istotnie niższa w stosunku do biomasy glonów i wносиła  $28,91 \pm 3,06 \text{ mg/g s.m.}$  oraz  $3,19 \pm 0,47 \text{ mg/g s.m.}$  Stosunek C:N kształtował się na średnim poziomie  $13,76 \pm 0,79$ . Ilość białka ogólnego w tym przypadku wynosiła  $18,27 \pm 1,73\%$  s.m., średnia koncentracja tłuszczów  $3,02 \pm 0,21\%$  s.m., natomiast cukrów nieredukujących  $60,38 \pm 5,28\%$  s.m. Proces polegający na zastosowaniu kompozycji substratowych różniących się stosunkiem suchej masy organicznej pochodzącej z biomasy glonów oraz sianokiszonki wpływał bezpośrednio na zmianę istotnych dla przebiegu fermentacji metanowej właściwości substratu. Najbardziej istotne różnice dotyczyły zmiany wartości stosunku C:N. Testowanie odmiennych kompozycji substratowych miało wpływ na zmiany wartości analizowanych wskaźników, w tym suchej masy organicznej, koncentracji  $P_{\text{og.}}$ , białka, substancji tłuszczowych oraz węglowodanów. Szczegółowe wartości analizowanych parametrów biomasy stosowanej badaniach zaprezentowano w tabeli 15.

### **4.2.2. Charakterystyka ilości i składu biogazu**

Najwyższe efekty technologiczne związane z ilością oraz składem wytwarzanego biogazu uzyskano w wariacie I, w którym do eksploatowanych reaktorów wprowadzano jedynie biomasę mikroglonów pozyskiwanych z wód



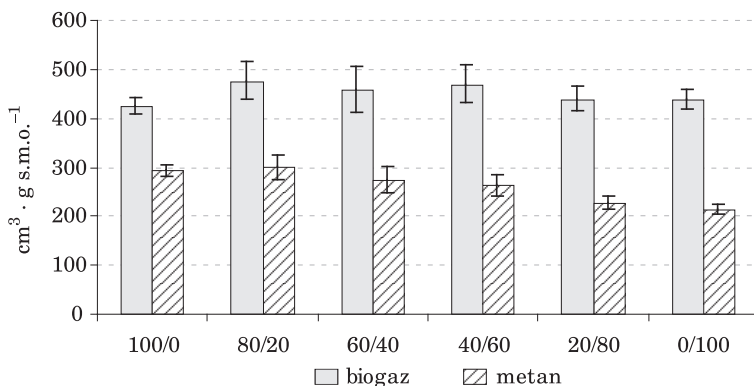
Tabela 15

Charakterystyka biomasy w przy różnych stosunkach s.m.o. biomasy glonów/s.m.o. sianokiszonki

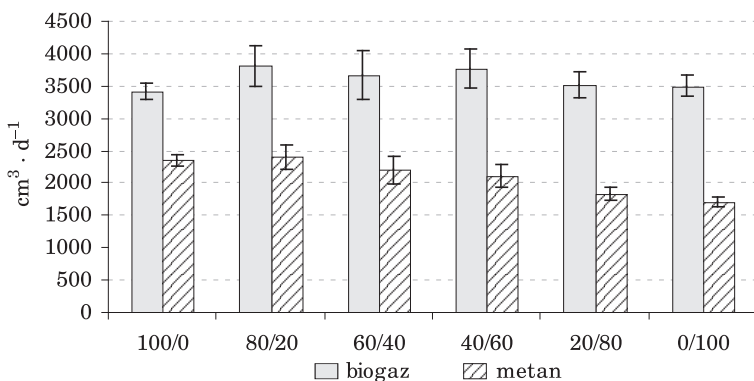
Parametr	Jednostka	100/0		80/20		60/40	
		średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	8,05	0,94	15,81	4,12	21,21	1,27
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	89,27	1,50	89,74	3,34	90,21	2,05
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	10,73	1,50	10,26	3,34	9,79	2,05
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	66,06	6,15	58,63	7,12	51,20	4,67
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	7,02	1,09	6,25	1,34	5,49	0,96
TC	[mg/g s.m.]	469,11	5,40	463,18	21,91	457,25	30,74
TOC	[mg/g s.m.]	436,41	9,10	428,67	19,83	420,93	23,17
Stosunek C:N	–	7,10	0,59	7,31	1,47	8,22	1,59
pH	–	7,19	0,56	7,05	0,36	6,86	0,59
Białko	[% s.m.]	41,29	3,84	36,69	4,40	32,08	2,84
Tłuszcze	[% s.m.]	13,62	2,20	11,50	2,73	9,38	1,78
Cukry	[% s.m.]	21,92	2,07	29,61	4,18	37,30	4,03
Parametr	Jednostka	40/60		20/80		0/100	
		średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	33,11	1,28	41,47	3,19	49,82	4,26
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	90,68	1,04	91,15	0,72	91,62	1,39
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	9,32	1,04	8,85	0,72	8,38	1,39
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	43,77	2,72	36,34	5,06	28,91	3,06
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	4,72	1,13	3,96	1,38	3,19	0,47
TC	[mg/g s.m.]	451,32	17,05	445,39	29,88	439,46	21,61
TOC	[mg/g s.m.]	413,20	15,66	405,46	23,71	397,72	11,83
Stosunek C:N	–	9,44	1,02	11,16	0,54	13,76	0,79
pH	–	6,59	0,73	6,15	0,19	5,32	0,11
Białko	[% s.m.]	27,48	1,13	22,87	2,75	18,27	1,73
Tłuszcze	[% s.m.]	7,26	1,02	5,14	2,11	3,02	0,21
Cukry	[% s.m.]	45,00	3,95	52,69	8,03	60,38	5,28

Zalewu Wiślanego. Zastosowanie obciążenia modelowych komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych na poziomie  $2 \text{ g s.m.o./dm}^3 \cdot \text{d}$  pozwoliło na uzyskanie wydajności produkcji biogazu oscylującej wokół wartości  $427,33 \pm 16,69 \text{ cm}^3/\text{g s.m.o.}$  oraz  $381,48 \pm 21,56 \text{ cm}^3/\text{g s.m.}$  (rys. 4). Dobowa produkcja biogazu uzyskana z reaktorów beztlenowych o objętości czynnej  $4 \text{ dm}^3$  wynosiła średnio  $3051,84 \pm 172,48 \text{ cm}^3/\text{d}$  (rys. 5). Zawartość metanu w gazowych produktach metabolizmu bakterii beztlenowych, w tym wariacie eksperymentu kształtowała się na poziomie  $69,27 \pm 1,74\%$ , co w sposób bezpośredni wpływało na efektywność wytwarzania metanu (rys. 6). Wynosiła ona

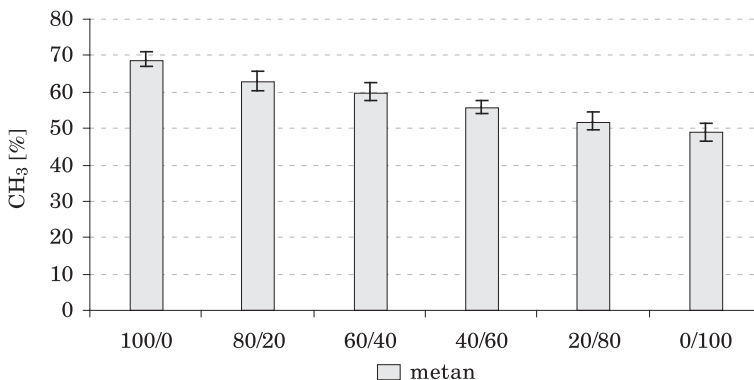
średnio  $296,01 \pm 19,29 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.o.}$  oraz  $264,25 \pm 21,95 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{g s.m.}$ . Produkcja metanu w ciągu doby oscylowała na poziomie  $2114,01 \pm 175,58 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$  (rys. 5).



Rys. 4. Efektywność produkcji biogazu i metanu



Rys. 5. Objętość biogazu i metanu uzyskana w ciągu doby



Rys. 6. Zawartość metanu w biogazie w zależności od wariantu technologicznego

Niezależnie od zastosowanego wariantu technologicznego związanego z zastosowaniem kompozycji substratowej opartej na biomase mikroglonów oraz biomase sianokiszonki obserwowano porównywalne ilości wytwarzanego biogazu. Wartość tego parametru, charakteryzującego efektywność procesu fermentacji metanowej, mieściła się w zakresie od  $477,09 \pm 39,12 \text{ cm}^3/\text{g}$  s.m.o. w wariacie 80/20 do  $440,38 \pm 24,69 \text{ cm}^3/\text{g}$  s.m.o. w wariacie 40/60 (rys. 4). Analiza uzyskanych wyników pozwala stwierdzić, iż zawartość metanu w biogazie zmniejszała się systematycznie wraz ze wzrostem udziału biomasy pochodzącej z sianokiszonki w testowanym substracie organicznym. Obserwowany procentowy udział tego komponentu biogazu kształtował się na poziomie od  $63,48 \pm 2,67\%$  w wariacie 80/20 do  $52,62 \pm 2,54\%$  w wariacie 20/80 (rys. 6). Całkowita objętość wytwarzanego metanu w ciągu doby wynosiła  $2404,1 \pm 197,16 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$  w wariacie 80/20;  $2203,20 \pm 222,19 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$  w wariacie 60/40;  $2105,61 \pm 169,84 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$  w wariacie 40/60 oraz  $1830,43 \pm 102,71 \text{ cm}^3 \text{ CH}_4/\text{d}$  w wariacie 20/80 (rys. 5). Najniższe efekty technologiczne obserwowano w przypadku, w którym do eksploatowanych reaktorów fermentacyjnych wprowadzano jedynie sianokiszonkę. Ilość wytwarzanego biogazu została ograniczona do wartości  $438,06 \pm 19,88 \text{ cm}^3/\text{g}$  s.m.o. (rys. 5). Zawartość metanu w tym wariacie technologicznym kształtowała się na poziomie  $49,21 \pm 2,852\%$  (rys. 6). Wydajność produkcji metanu wynosiła  $214,62 \pm 9,74 \text{ cm}^3/\text{g}$  s.m.o. (rys. 4). Notowane wartości były istotnie niższe od uzyskanych w wariantach 80/20 – 40/60. Dobowy uzysk biogazu wynosił średnio  $4504,41 \pm 159,04 \text{ cm}^3/\text{d}$ , natomiast metanu  $1716,96 \pm 77,93 \text{ cm}^3/\text{d}$  (rys. 5).

### 4.2.3. Charakterystyka osadów pofermentacyjnych

Niezależnie od okresu, w którym pozyskiwano biomase mikroglonów stosowaną w eksperymencie, charakterystyka osadów pofermentacyjnych była podobna i w większości analizowanych wskaźników nie notowano istotnych różnic (tabela 16). Zawartość suchej masy organicznej mieściła się w wąskim zakresie od  $3,92 \pm 0,93\%$  ś.m. do  $5,29 \pm 1,29\%$  ś.m., natomiast koncentracja substancji organicznych kształtowała się na poziomie od  $62,77 \pm 1,99\%$  s.m. do  $66,18 \pm 4,03\%$  s.m. Zawartość substancji węglowych w suchej masie osadów pofermentacyjnych charakteryzowana wartościami TOC kształtowała się na poziomie od  $315,18 \pm 29,96 \text{ mg/g}$  s.m. do  $268,42 \pm 17,66 \text{ mg/g}$  s.m., natomiast TC oscylowała w zakresie od  $341,92 \pm 11,83 \text{ mg/g}$  s.m. do  $309,17 \pm 21,93 \text{ mg/g}$  s.m. Koncentracja Ncałk. mieściła się w zakresie od  $20,93 \pm 3,59 \text{ mg/g}$  s.m. w wariacie 0/100 do  $54,19 \pm 3,11 \text{ mg/g}$  s.m. w wariacie 80/20. Szczegółowe dane dotyczące charakterystyki osadów pofermentacyjnych uzyskiwanych w kolejnych wariantach realizowanych prac badawczych przedstawiono w tabeli 16.

Tabela 16

## Charakterystyka osadu przefermentowanego

Parametr	Jednostka	100/0		80/20		60/40	
		średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	3,92	0,93	4,21	1,12	4,77	2,28
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	63,83	3,17	66,18	4,03	64,19	3,37
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	36,17	3,17	33,82	4,03	35,81	3,37
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	39,09	2,03	54,19	3,11	50,06	2,74
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	4,27	1,38	6,88	1,86	3,72	0,82
TC	[mg/g s.m.]	328,15	41,74	309,17	21,93	341,92	33,73
TOC	[mg/g s.m.]	315,18	29,96	268,42	17,66	302,06	21,91
Stosunek C:N	–	8,39	0,61	4,96	1,79	6,04	0,94
pH	–	7,48	0,19	7,41	0,38	7,29	0,17
Białko	[% s.m.]	24,43	1,27	33,87	1,94	31,28	1,71
Tłuszcze	[% s.m.]	3,02	0,45	2,03	1,07	1,88	0,45
Cukry	[% s.m.]	2,51	0,51	1,33	0,19	0,93	0,19
Parametr	Jednostka	40/60		20/80		0/100	
		średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.	średnia	odchyl. std.
Sucha masa	[% ś.m.]	4,13	2,03	5,29	1,29	4,71	1,02
Sucha masa organiczna	[% s.m.]	62,77	1,99	66,14	1,76	64,05	1,17
Sucha masa mineralna	[% s.m.]	37,23	1,99	33,86	1,76	35,95	1,17
Azot całkowity	[mg/g s.m.]	39,02	4,16	29,03	1,52	20,93	3,59
Fosfor całkowity	[mg/g s.m.]	2,77	1,47	1,77	0,53	1,91	0,94
TC	[mg/g s.m.]	327,12	41,99	312,48	17,32	317,61	37,82
TOC	[mg/g s.m.]	283,74	37,27	277,62	14,01	280,43	30,68
Stosunek C:N	–	7,26	1,18	9,56	0,49	13,39	0,86
pH	–	7,28	0,16	7,12	0,34	7,01	0,61
Białko	[% s.m.]	24,38	2,60	18,11	0,95	13,08	2,21
Tłuszcze	[% s.m.]	1,72	0,61	0,78	0,34	0,71	0,38
Cukry	[% s.m.]	1,04	0,36	2,04	0,33	2,11	1,25

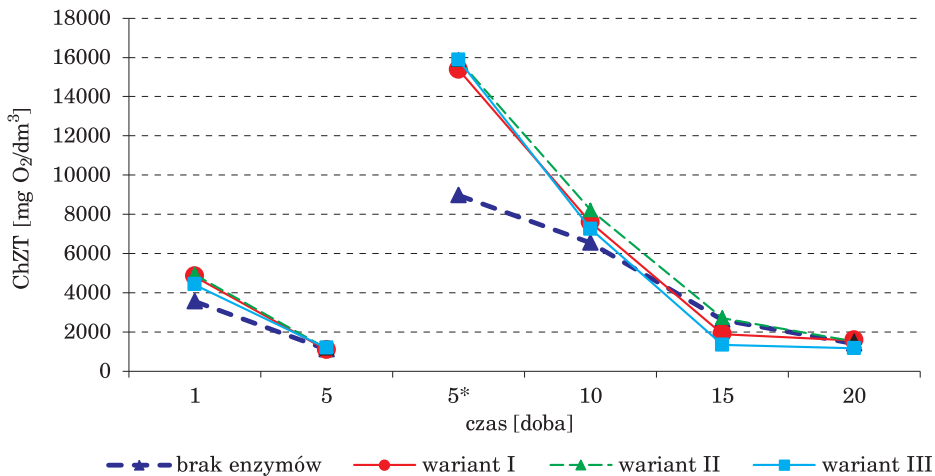
### 4.3. Eksperyment III

#### 4.3.1. Zmiany wartości wskaźnika ChZT w fazie rozpuszczonej

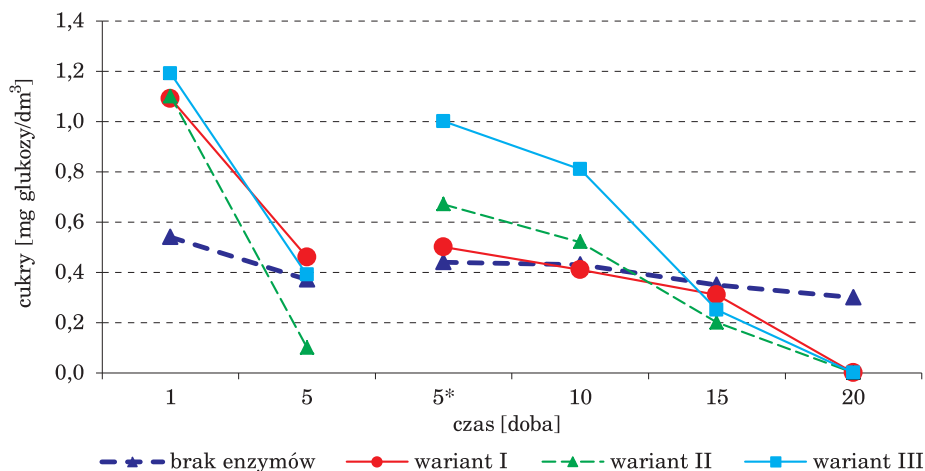
Wartość wskaźnika ChZT w fazie rozpuszczonej stosowanego substratu kształtowała się w przedziale od 4420 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup> w wariancie III do 4940 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup> w wariancie II. Istotnie niższą wartość tego wskaźnika na średnim poziomie 3560 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup> stwierdzono w fazie rozpuszczonej biomasy

glonowej nie poddanej procesowi wstępnego roztwarzania enzymatycznego. Efektywność wykorzystywania związków organicznych wyrażonych wskaźnikiem ChZT w procesie fermentacyjnym z fazy rozpuszczonej podczas pierwszych pięciu dni eksperymentu oscylowała w granicach 70,0–77,5% niezależnie od wariantu eksperymentu. Najniższą wartość tego parametru, która wynosiła średnio  $1080 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ , stwierdzono w wariancie II. Bezpośrednio po wprowadzeniu do układu technologicznego całkowitej ilości substratu roślinnego wartość ChZT w fazie rozpuszczonej kształtowała się w zakresie od  $15360 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$  w wariancie I do  $15860 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$  w wariancie II i III. W wariancie, w którym nie prowadzono wstępnej hydrolizy enzymatycznej, wartość tego wskaźnika wynosiła średnio  $8960 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ , co świadczy o bezpośrednim wpływie zastosowanej metody kondycjonowania substratu na zawartość związków organicznych w fazie rozpuszczonej.

Wartości wskaźnika ChZT w próbach pobieranych w kolejnych dniach prowadzenia eksperymentu pozwalają stwierdzić, iż proces wykorzystania rozpuszczonej frakcji węgla organicznego przebiegał podobnie, niezależnie od dawki multikompleksu enzymów stosowanych w procesie wstępnego przygotowania biomasy. W wariancie I substancje organiczne charakteryzowane wartością wskaźnika ChZT zostały usunięte w 91%, natomiast w wariantach II i III wartość ta kształtowała się na poziomie 92,5%. W próbie, w której biomasy glonowej nie poddawano wstępnemu biochemicznemu przetwarzaniu, notowana sprawność wykorzystania związków organicznych z fazy rozpuszczonej kształtowała się na poziomie 85%.



Rys. 7. Zmiany wartości ChZT w fazie rozpuszczonej w czasie trwania eksperymentu w zależności od zastosowanego wariantu technologicznego (5\* – moment wprowadzenia substratu)



Rys. 8. Zmiany stężenia glukozy w fazie rozpuszczonej w czasie trwania eksperymentu w zależności od zastosowanego wariantu technologicznego (5\* – moment wprowadzenia substratu)

Efektem 24-godzinnej inkubacji testowanej biomasy glonów i multikompleksów enzymów był blisko dwukrotny wzrost stężenia węglowodanów w fazie rozpuszczonej w stosunku do poddanej jedynie procesowi termicznej depolimeryzacji. Początkowe stężenie glukozy w układzie technologicznym, do którego nie wprowadzono multikompleksu enzymów, wynosiło  $0,54 \text{ mg/dm}^3$ . W wariantcie I koncentracja tego cukru kształtowała się na średnim poziomie  $1,09 \text{ mg/dm}^3$ , natomiast w wariantach II i III wynosiła odpowiednio  $1,1 \text{ mg/dm}^3$  oraz  $1,19 \text{ mg/dm}^3$ . Po pięciu dobach fermentacji prowadzonej w reaktorach modelowych najwyższą skuteczność wykorzystania tego związku obserwowano w wariantcie II. W tym przypadku końcowa koncentracja glukozy wynosiła  $0,1 \text{ mg/dm}^3$ . W próbie bez wstępnej hydrolizy enzymatycznej zawartość cukrów kształtowała się na poziomie  $0,37 \text{ mg/dm}^3$ . Istotny wpływ zastosowania procesu wstępnej hydrolizy enzymatycznej potwierdzają zanotowane koncentracje glukozy w fazie rozpuszczonej po wprowadzeniu do układu technologicznego kolejnej dawki substratu. W przypadku zastosowania jedynie wstępnego procesu termicznej depolimeryzacji zawartość tego związku wynosiła średnio  $0,44 \text{ mg/dm}^3$ . W pozostałych wariantach eksperymentalnych stężenie glukozy w fazie rozpuszczonej analizowanego substratu rosła proporcjonalnie do zastosowanej dawki multikompleksu enzymów od  $0,50 \text{ mg/dm}^3$  do  $1,0 \text{ mg/dm}^3$ . Enzymatyczne kondycjonowanie spowodowało istotne zwiększenie procesu wykorzystania węglowodanów przez mikroorganizmy prowadzące proces fermentacji. Skutkowało to całkowitym wykorzystaniem tych związków po 20 dobach trwania eksperymentu. W wariantcie, w którym fermentowano

biomasę glonową bez przetworzenia enzymatycznego, stężenie węglowodanów po zakończeniu eksperymentu wynosiło 0,3 mg/dm<sup>3</sup>.

Największy spadek stężenia suchej masy testowanego substratu podczas procesu fermentacji obserwowano w wariancie I. Wynosił on średnio 38,7% i był o 14,0% większy niż w przypadku, w którym zastosowano jedynie proces hydrotermalnej depolimeryzacji. W wariantach II i III spadek koncentracji biomasy wynosił średnio 32%. Wartości suchej masy na początku i na końcu cyklu eksperymentalnego zaprezentowano w tabeli 17.

Tabela 17  
Zmiany koncentracji suchej masy podczas trwania eksperymentu

Wariant	Sucha masa ogólna [mg/dm <sup>3</sup> ]		Ograniczenie ilości suchej masy ogólnej [%]
	1 dzień	20 dzień	
Bez enzymów	14410	12270	14,85
I	14410	8830	38,7
II	14410	9890	31,4
III	14410	9720	32,54

Tabela 18  
Charakterystyka ilości i składu biogazu w zależności od wariantu eksperymentu

Parametr	Wariant			
	brak enzymów	I	II	III
Zawartość C w fazie gazowej [mol]	0,004829	0,003743	0,006497	0,007023
Zawartość CO <sub>2</sub> w fazie gazowej [mol]	0,00136	0,001378	0,001605	0,00188
Zawartość CH <sub>4</sub> w fazie gazowej [mol]	0,00347	0,002634	0,004805	0,005122
Zawartość CO <sub>2</sub> [%]	28,2	36,8	25	26,8
Zawartość CH <sub>4</sub> [%]	71,8	63,2	73,2	73,2
Ilość gazu w warunkach normalnych [dm <sup>3</sup> /g]	0,033	0,021	0,045	0,054

Najwyższą intensywnością produkcji biogazu charakteryzowały się warianty II i III. Uzyskana w nich ilość biogazu wyniosła odpowiednio 0,040 dm<sup>3</sup>/g substratu oraz 0,054 dm<sup>3</sup>/g substratu. Próba z dodatkiem enzymów w dawce najmniejszej pozwoliła na uzyskanie 0,022 dm<sup>3</sup> biogazu/g substratu. Zawartość metanu we wszystkich wariantach eksperymentu była zróżnicowana i kształtowała się w granicach od 63,0% w wariancie I do 73,2% w przypadku wariantu II i III. Oprócz składu i ilości powstającego gazu określono ilości węgla powstałego w fazie gazowej procesu – parametr ten wyznaczał oddychanie pokarmowe. Oddychanie egzogenne zachodziło na

skutek dodatku substratu roślinnego, który stanowi źródło dla mikroorganizmów osadu czynnego. Oddychanie egzogenne warunkuje usunięcie zanieczyszczeń organicznych i związków azotowych. Najlepsze efekty osiągnięto w przypadku wariantów, w których zastosowane zostały enzymy w dwóch najwyższych dawkach. Uzyskano wówczas dwukrotnie więcej węgla niż w przypadku próby z najmniejszą ilością enzymów i próby bez ich dodatku. Otrzymane wyniki przedstawia tabela 18.

## **5. Analiza ilościowa i energetyczna biomasy roślinności wodnej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego**

Zgodnie z danymi uzyskanymi z Zarządu Melioracji i Urządzeń Wodnych w Olsztynie dotyczącymi ewidencji robót związanych z okresowym oczyszczaniem zbiorników wodnych określono, iż w roku 2009 przeprowadzono:

- koszenie dna skarp rzek i kanałów: 2044,77 ha,
- hakowanie roślin korzeniących się w dnie rzek i kanałów: 197,92 ha.

### **5.1. Średnie ilości biomasy roślin wodnych pozyskanych podczas prac związanych z koniecznością oczyszczania zbiorników wodnych**

Średnie ilości biomasy roślin wodnych pozyskanych w wyniku koszenia skarp rzek i kanałów:

- powierzchnia koszenia [ha]: 2044,77 ha/rok
- ilość świeżej masy biomasy roślinnej [t/ha]: 18,0 t/ha
- ilość świeżej masy biomasy roślinnej [t/rok]: 36805,86 t/rok
- zawartość suchej masy w świeżej biomasy roślinnej [%]: 27,2%
- ilość suchej masy biomasy roślinnej [t/ha]: 4,90 t s.m./ha
- ilość suchej masy biomasy roślinnej [t/rok]: 10019,37 t s.m./rok
- zawartość suchej masy organicznej w suchej masie [%]: 84,3%
- ilość suchej masy organicznej [t/ha]: 4,12 t s.m.o./ha
- ilość suchej masy organicznej [t/rok]: 8424,45 t s.m.o/rok

Średnie ilości biomasy roślin wodnych pozyskanych w wyniku hakowania roślin korzeniących się w dnie rzek i kanałów:

- powierzchnia koszenia [ha]: 197,92 ha/rok
- ilość świeżej masy biomasy roślinnej [t/ha]: 6,4 t/ha
- ilość świeżej masy biomasy roślinnej [t/rok]: 1266,69 t/rok



- zawartość suchej masy w świeżej biomasy roślinnej [%]: 18,9%
- ilość suchej masy biomasy roślinnej [t/ha]: 1,21 t s.m./ha
- ilość suchej masy biomasy roślinnej [t/rok]: 239,48 t s.m./rok
- zawartość suchej masy organicznej w suchej masie [%]: 87,9%
- ilość suchej masy organicznej [t/ha]: 1,06 t s.m.o./ha
- ilość suchej masy organicznej [t/rok]: 209,79 t s.m.o./rok

Całkowity bilans biomasy roślinności wodnej możliwe do uzyskania w wyniku oczyszczania brzegów i dna zbiorników wodnych na terenie województwa warmińsko-mazurskiego:

- ilość świeżej masy biomasy roślinnej [t/rok]:  
6805,86 t/rok  $\pm$  1266,69 t/rok = 38072,55 t/rok
- ilość suchej masy biomasy roślinnej [t/rok]:  
10019,37 t s.m./rok  $\pm$  239,48 t s.m./rok = 10258,85 t s.m./rok
- ilość suchej masy organicznej [t/rok]:  
8424,45 t s.m.o./rok  $\pm$  209,79 t s.m.o./rok = 8634,24 t s.m.o./rok

## 5.2. Bilans energetycznej przetworzonej w biogaz biomasy wodnej pozyskanej na terenie województwa warmińsko-mazurskiego

Bilans energetyczny roślinności wodnej pozyskiwanej w wyniku okresowego wykaszania brzegów zbiorników wodnych:

Parametry wyjściowe:

Ilość biomasy: 8424,45 t s.m.o./rok

Wydajność produkcji biogazu: 350 m<sup>3</sup>/t s.m.o.

Zawartość metanu w biogazie: 55%

Wartość kaloryczna metanu: 9,17 kWh/m<sup>3</sup>

Średnia sprawność cieplna w kogeneracji: 43%

Średnia sprawność cieplna w kogeneracji: 38%

Zużycie ciepła na cele procesowe biogazowni: 30% produkcji ciepła brutto

Zużycie energii elektrycznej na cele procesowe: 9% produkcji energii brutto

Czas pracy generatora: 8000 h/rok

Roczna produkcja metanu:

$$8424,45 \text{ t s.m.o./rok} \cdot 350 \text{ m}^3_{\text{biogazu}}/\text{t s.m.o.} \cdot 0,55 = 1,62 \text{ mln m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok}$$

Roczna produkcja energii:

$$1621706,625 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3_{\text{CH}_4} = 14,87 \text{ tys. MWh/rok}$$

Teoretyczna moc cieplna:

$$(1,62 \text{ mln m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} : 365 \text{ d} : 24 \text{ h}) \text{ m}^3/\text{h} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3_{\text{CH}_4} \cdot 0,43 = 729,97 \text{ kW}$$

Teoretyczna moc elektryczna:

$$(1,62 \text{ mln m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} : 365 \text{ d} : 24 \text{ h}) \text{ m}^3/\text{h} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3_{\text{CH}_4} \cdot 0,38 = 645,09 \text{ kW}$$

Produkcja ciepła brutto:

$$729,97 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} \cdot 3,6 = 21,02 \text{ mln GJ/rok}$$

Zużycie ciepła na cele procesowe:

$$21,02 \text{ mln GJ/rok} \cdot 0,3 = 6,3 \text{ mln GJ/rok}$$

Produkcja ciepła netto:

$$21,02 \text{ mln GJ/rok} - 6,3 \text{ mln GJ/rok} = 14,72 \text{ mln GJ/rok}$$

Produkcja energii elektrycznej brutto:

$$645,09 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} = 5160,72 \text{ MWe/rok}$$

Zużycie energii na cele procesowe:

$$5160,72 \text{ MWe/rok} \cdot 0,09 = 464,47 \text{ MWe/rok}$$

Produkcja energii elektrycznej netto:

$$5160,72 \text{ MWe/rok} - 464,47 \text{ MWe/rok} = 4696,25 \text{ kWe/rok}$$

Bilans energetyczny roślinności wodnej pozyskiwanej w wyniku okresowego hakowania roślin korzeniących się w dnie rzek i kanałów:

Parametry wyjściowe:

Ilość biomasy: 209,79 t s.m.o./rok

Wydajność produkcji biogazu: 270 m<sup>3</sup>/t s.m.o.

Zawartość metanu w biogazie: 58%

Wartość kaloryczna metanu: 9,17 kWh/m<sup>3</sup>

Średnia sprawność cieplna w kogeneracji: 43%

Średnia sprawność cieplna w kogeneracji: 38%

Zużycie ciepła na cele procesowe biogazowni: 30% produkcji ciepła brutto

Zużycie energii elektrycznej na cele procesowe: 9% produkcji energii brutto

Czas pracy generatora: 8000 h/rok

Roczna produkcja metanu:

$$209,79 \text{ t s.m.o./rok} \cdot 270 \text{ m}^3_{\text{biogazu}}/\text{t s.m.o.} \cdot 0,58 = 32853,1 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok}$$

Roczna produkcja energii:

$$32853,1 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3 = 301,26 \text{ MWh/rok}$$

Teoretyczna moc cieplna:

$$(32853,1 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} : 365 \text{ d} : 24 \text{ h}) \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{h} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3 \cdot 0,43 = 135,61 \text{ kW}$$

Teoretyczna moc elektryczna:

$$(32853,1 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{rok} : 365 \text{ d} : 24 \text{ h}) \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{h} \cdot 9,17 \text{ kWh/m}^3 \cdot 0,38 = 119,84 \text{ kW}$$

Produkcja ciepła brutto:

$$135,61 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} \cdot 3,6 = 3,9 \text{ mln GJ/rok}$$

Zużycie ciepła na cele procesowe:

$$3,9 \text{ mln GJ/rok} \cdot 0,3 = 1,17 \text{ mln GJ/rok}$$

Produkcja ciepła netto:

$$3,9 \text{ mln GJ/rok} - 1,17 \text{ mln GJ/rok} = 2,73 \text{ mln GJ/rok}$$

Produkcja energii elektrycznej brutto:

$$119,84 \text{ kW} \cdot 8000 \text{ h} = 958,72 \text{ MWe/rok}$$

Zużycie energii na cele procesowe:

$$958,72 \text{ MWe/rok} \cdot 0,09 = 862,85 \text{ MWe/rok}$$

Produkcja energii elektrycznej netto:

$$958,72 \text{ MWe/rok} - 862,85 \text{ MWe/rok} = 95,87 \text{ MWe/rok}$$

## 6. Podsumowanie i wnioski

Stężenia suchej masy glonów pozyskiwanych z wód Zalewu Wiślanego mieściły się w zakresie od  $144,2 \text{ g/m}^3$  do  $151,6 \text{ g/m}^3$ . W pozyskiwanej biomase oprócz alg występowała również obumarła materia organiczna pochodząca głównie od roślin naczyniowych. Ilość suchej masy organicznej w separowanym i zagęszczanym substracie mieściła się w zakresie od 75,1% do 82,3%.

W przypadku, gdy w procesie filtracji stosowano wariant, w którym testowano efektywność pracy filtra o średnicy porów przegrody filtracyjnej na poziomie  $10,0 \mu\text{m}$ , koncentracja suchej masy w odpływie do Zalewu Wiślanego kształtowała się na średnim poziomie  $8,64 \text{ g/m}^3$ . W przypadku wykorzystania bębna filtracyjnego o średnicy oczek  $40 \mu\text{m}$  wartość tego parametru wynosiła średnio  $29,92 \text{ g/m}^3$ . W zależności do zastosowania rozwiązania technologicznego separowana i zagęszczona biomasa wodna charakteryzowała się różnym stopniem uwodnienia, które mieściło się w zakresie od 99,6% w wariantcie I do 97,90% podczas doświadczeń prowadzonych w IV wariantcie eksperymentu.

W trakcie prowadzonych badań respirometrycznych biomasy pozyskanej z wód Zalewu Wiślanego stwierdzono, iż głównym czynnikiem wpływającym na efektywność procesu fermentacji metanowej pod kątem ilości oraz jakości uzyskiwanego biogazu było zastosowanie obciążenie modelowych komórek fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych. Nie zanotowano natomiast istotnego wpływu okresu, w którym pozyskiwano biomasę glonów na sprawność wytwarzania biogazu. Ilość biogazu kształtowała się w zakresie od  $603,4 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  w lipcu przy stosowanym obciążeniu na poziomie  $1 \text{ kg s.m.o./m}^3$  do  $420,4 \text{ dm}^3/\text{kg s.m.o.}$  w czerwcu przy stosowanym obciążeniu na poziomie  $5 \text{ kg s.m.o./m}^3$ . Zawartość metanu w biogazie oscylowała w zależności od obciążenia od 47,7% do 68,3%.

Przeprowadzone badania stanowią podstawę do rozważań nad możliwością wykorzystania biomasy glonów pochodzących z naturalnych zbiorników jako potencjalnego substratu w systemach produkcji biogazu. Pozwoliły one zweryfikować końcowe efekty procesu fermentacji pod kątem ilości oraz składu jakościowego biogazu, a także jakości osadów. W eksperymentach wykazano wpływ dodatku biomasy glonów na ilość gazowych produktów metabolizmu

bakterii beztlenowych podczas fermentacji typowych substratów roślinnych stosowanych w biogazowniach rolniczych.

W analizowanych badaniach stwierdzono, iż najwyższe efekty technologiczne związane z ilością oraz składem wytwarzanego biogazu uzyskano w wariantcie I, w którym do eksploatowanych reaktorów wprowadzano jedynie biomasę mikroglonów pozyskiwanych z wód Zalewu Wiślanego.

Niezależnie od wariantu technologicznego związanego z zastosowaniem kompozycji substratowej opartej na biomacie mikroglonów oraz biomacie sianokiszonki obserwowano porównywalne ilości wytwarzanego biogazu. Stwierdzono, iż zawartość metanu w biogazie zmniejszała się systematycznie wraz ze wzrostem udziału biomasy pochodzącej z sianokiszonki w testowanym substracie organicznym.

Najniższe efekty technologiczne obserwowano w przypadku, gdy do eksploatowanych reaktorów fermentacyjnych wprowadzano jedynie sianokiszonkę. Niezależnie od okresu, w którym pozyskiwano biomasę mikroglonów stosowaną w eksperymencie, charakterystyka osadów pofermentacyjnych była podobna i w większości analizowanych wskaźników nie notowano istotnych różnic.

Zastosowane metody obróbki wstępnej okazały się być bardzo efektywne. Hydroliza enzymatyczna biomasy glonowej spowodowała uwolnienie znacznej ilości węglowodanów do fazy rozpuszczonej, które stały się łatwiej dostępne i zostały szybciej wykorzystane podczas procesu fermentacji metanowej. Efektem aktywności enzymów był wzrost ilości wytwarzanego biogazu oraz poprawa jego składu jakościowego.

Podczas eksperymentu obserwowano również zmniejszenie zawartości suchej masy we wsadzie przefermentowanym. Zjawisko to było szczególnie widoczne, gdy do biomasy glonowej wprowadzono multikompleks enzymów.

Analiza ilości biomasy roślinności wodnej, którą można pozyskać podczas zabiegów melioracyjnych polegających na koszeniu dna oraz skarp rzek i kanałów oraz hakowaniu roślin korzeniących się w dnie, wykazała, iż kształtuje się ona na poziomie 8600 ton suchej masy organicznej w ciągu roku, co umożliwia uzyskanie mocy elektrycznej biogazowni około 760 kW.

## 7. Literatura

1. Akkerman I., Janssen M., Rocha J., Wijffels R.H. 2002. *Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design*. International Journal of Hydrogen Energy, 27(11): 1195–208.
2. Anagnostidis A., Komárek J. 1985. *Modern approach to the classification system of cyanophytes. 1 – Introduction*. Algological Studies, 38–39: 291–302.

3. Anagnostidis A., Komárek J. 1988. *Modern approach to the classification system of cyanophytes. 3 – Oscillatoriales*. Algological Studies, 50–53: 327–472.
4. Anagnostidis A., Komárek J. 1990. *Modern approach to the classification system of cyanophytes. 5 – Stigonematales*. Algological Studies, 59: 1–73.
5. Borjesson P., Berglund M. 2006. *Environmental systems analysis of biogas systems – part I: Fuel-cycle emissions*. Biomass Bioenergy, 30(5): 469–485.
6. Borowitzka M.A. 1999. *Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters*. J. Biotechnol., 70: 313–321.
7. Brennan L., Owende P. 2010. *Biofuels from microalgae A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-product*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(2): 557–577.
8. Bruhn A., Dahl J., Nielsen H.B., Nikolaisen L., Rasmussen M.B., Markager S., Olesen B., Arias C., Jensen P.D. 2011. *Bioenergy potential of Ulva lactuca: biomass yield, methane production and combustion*. Bioresour. Technol., 102(3): 2595–2604.
9. Burczyk J., Dworzanski J. 1988. *Comparison of sporopollenin like algal resistant polymer from cell-wall of Botryococcus, Scenedesmus and Lycopodium clavatum by GC pyrolysis*. Phytochemistry, 27: 2151–2153.
10. Campbell J., Lobell D., Field C. 2009. *Greater transportation energy and GHG offsets from bioelectricity than ethanol*. Science, 324: 1055–1057.
11. Cantrell K.B., Ducey T., Ro K.S., Hunt P.G. 2008. *Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities*. Bioresource Technology, 99(17): 7941–53.
12. Carver S.M., Hulatt C.J., Thomas D.N., Tuovinen O.H. 2011. *Thermophilic, anaerobic co-digestion of microalgal biomass and cellulose for H<sub>2</sub> production*. Biodegradation, 22(4): 805–814.
13. Chynoweth D.P., Fannin K.F., Srivastava V.J. 1987. *Biological gasification of marine algae*. In: Bird KT, Benson PH, editors. *Seaweed cultivation for renewable resources*. New York, Elsevier: 285–303.
14. Chynoweth D.P., Turick C.E., Owens J.M., Jerger D.E., Peck M.W. 1993. *Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks*. Biomass Bioenergy, 5(1): 95–111.
15. Clark J., Deswarte F. 2008. *Introduction to chemicals from biomass*. In: Stevens C.V. (ed.) *Wiley series in renewable resources*. John Wiley & Sons.
16. Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R.-A., Steyer J.-P. 2011. *Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production*. Bioresource Technology, 102, 1: 207–214.
17. De Schampelaire L., Verstraete W. 2009. *Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system*. Biotechnol. Bioeng., 103: 296–304.
18. Dębowski M., Zieliński M., Dudek M., Grala A. 2012a. *Wpływ dodatku biomasy makroglonów na efektywność procesu fermentacji metanowej sianokiszonki*. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska (w druku).
19. Dębowski M., Grala A., Zieliński M., Dudek M. 2012c. *Efficiency of the methane fermentation process of macroalgae biomass originating from puck bay*. Archives of Environmental Protection (w druku).
20. Dębowski M., Krzemieniewski M., Zieliński M. 2011a. *Energetyka alternatywna*. Monografia, rozdział pt.: *Algi perspektywnym źródłem biopaliw o różnej charakterystyce i właściwościach. Metody hodowli, ekonomika procesu*. 15–25, Wydawnictwo Dolnośląskiej Wyższej Szkoły Przedsiębiorczości i Techniki w Polkowicach. Polkowice.
21. Dębowski M., Krzemieniewski M., Zieliński M. 2012b. *Effect of algae biomass addition on the effectiveness of methane fermentation of maize silage*. IV International symposium on energy from biomass and waste. San Servolo, Venice (Italy), 12–15. 11. 2012.
22. Dębowski M., Krzemieniewski M., Zieliński M., 2009b, *The effect of microwave radiation on methane fermentation in mesophilic conditions*. Pol. J. Env. Stud., 18, 3A, 65–69.
23. Dębowski M., Zieliński M., Kluk A., Chomański Ł. 2011b. *Effect of Adua Kem Green chemicals on technological effectiveness of gasification of plant biomass*. Environment Protection Engineering, 37(3): 135–142.
24. Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M. 2011c. *Wydajność produkcji biomasy glonowej w reaktorze otwartym*. Rocznik Ochrona Środowiska, 13: 1743–1752.
25. Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M., Dudek M., Grala A. 2012e. *Microalgae – cultivation methods*, Polish Journal of Natural Sciences (w druku).

26. Demirbas A. 2001. *Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals*. Energy Conversion and Management, 42(11): 1357–78.
27. Demirbas A. *Oily products from mosses and algae via pyrolysis*. 2006. Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 28(10): 933–40.
28. Dote Y., Sawayama S., Inoue S., Minowa T., Yokoyama S.-Y. 1994. *Recovery of liquid fuel from hydrocarbon-rich microalgae by thermochemical liquefaction*. Fuel, 73(12): 1855–1857.
29. Doušková, I., Kaštanek, F., Maleterova, Y., Kaštanek, P., Doucha, J., Zachleder, V. 2010. *Utilization of distillery stillage for energy generation and concurrent production of valuable microalgal biomass in the sequence: Biogas-cogeneration-microalgae-products*. Energy Conversion and Management, 51: 606–611.
30. Dunahay T., Jarvis E., Dais S., Roessler P. 1996. *Manipulation of microalgal lipid production using genetic engineering*. Applied Biochemistry and Biotechnology, 57–58(1): 223–231.
31. Ettl H. 1983. *Chlorophyta I. Phytomonadina*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 9: 807.
32. Ettl H., Gärtner G. 1988. *Chlorophyta II. Tetrasporales, Chlorococcales, Gloeodendrales*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. VEB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 10: 436.
33. Förster K. 1982. *Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematik und Biologie. Conjugatophyceae. Zygnematales und Desmidiaceae (excl. Zygnemataceae)*. W: Elster H. J., Ohle W., (red.), Die Binnengewässer. Einzeldarstellungen aus der Limnologie und ihren Nachbargebieten. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, XVI, 8(1): 544.
34. Fott B. 1972. *Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematik und Biologie. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordnung: Tetrasporales*. W: Elster H. J., Ohle W. (red.), Die Binnengewässer. Einzeldarstellungen aus der Limnologie und ihren Nachbargebieten. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, XVI, 6: 116.
35. Fouchard S., Pruvost J., Degrenne B., Legrand J. 2008. *Investigation of H<sub>2</sub> production using the green microalga Chlamydomonas reinhardtii in a fully controlled photobioreactor fitted with on-line gas analysis*. International Journal of Hydrogen Energy, 33(13): 3302–3310.
36. Garcia-Malea Lopez M.C., Del Rio Sanchez E., Casas Lopez J.L., Acien Fernandez F.G., Fernandez Sevilla J.M., Rivas J., Guerrero M.G., Molina-Grima E. 2006. *Comparative analysis of the outdoor culture of Haematococcus pluvialis in tubular and bubble column photobioreactors*. J. Biotechnol., 123: 329–342.
37. Geber U. 2002. *Cutting frequency and stubble height of reed canary grass (Phalaris arundinacea L.): Influence on quality and quantity of biomass for biogas production*. Grass and Forage Science, 57 (4), 389–394.
38. Ghirardi M.L., Zhang L., Lee J.W., Flynn T., Seibert M., Greenbaum E. 2000. *Microalgae: a green source of renewable H<sub>2</sub>*. Trends in Biotechnology, 18(12): 506–511.
39. Golueke C., Oswald W., Gotaas H. 1957. *Anaerobic Digestion of Algae*. Appl. Environ. Microbiol., 5(1): 47–55.
40. González-Fernández C., Molinuevo-Salces B., García-González M.C. 2011. *Evaluation of anaerobic codigestion of microalgal biomass and swine manure via response surface methodology*. Appl. Energy, 88(10): 3448–3453.
41. Goyal H.B., Seal D., Saxena R.C. 2008. *Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(2): 504–517.
42. Grala A., Zieliński M., Dębowski M., Dudek M. 2012. *Effects of hydrothermal depolymerization and enzymatic hydrolysis of algae biomass on yield of methane fermentation process*. Pol. J. Environ. Stud., 21(2): 361–366.
43. Greenbaum E. 1998. *Energetic efficiency of hydrogen photoevolution by algal water splitting*. Biophysical Journal, 54(2): 365–368.
44. Guan Y., Deng M., Yu X., Zhang W. 2004. *Two-stage photo-biological production of hydrogen by marine green alga Platymonas subcordiformis*. Biochemical Engineering Journal, 19: 69–73.
45. Guo Z., Chen Z., Lu H., Fu Y., Yu X., Zhang W., 2008. *Sustained hydrogen photoproduction by marine green algae platymonas subcordiformis integrated with in situ hydrogen consumption by an alkaline fuel cell system*. Journal of Biotechnology, 136: 558–576.

46. Guo, L. 2007. *Doing battle with the green monster of Taihu Lake*. Science, 317(5842): 1166.
47. Harun R., Davidson M., Doyle M., Gopiraj R., Danquah M., Forde G. 2011. *Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility*. Biomass and Bioenergy, 35: 741–747.
48. Heusden G.P.H. 1972. *Estimation of the biomass of plankton*. Hydrobiol., 39(2): 165–208.
49. Hildebrand M., Davis A.K., Smith S.R., Traller J.C., Abbriano R. 2012. *The place of diatoms in the biofuels industry*. Biofuels, 3(2): 221–240.
50. Hirano A., Ueda R., Hirayama S., Ogushi Y. 1997. *CO<sub>2</sub> fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation*. Energy, 22(2–3): 137–142.
51. Hu Z.-H., Yu H.-Q. 2006. *Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures*. Waste Management. 26 (11), 1222–1228.
52. Hutorowicz A. 2005. *Metoda oceny stanu ekologicznego jezior w oparciu o fitoplankton*. Instytut Rybactwa Śródlądowego w Olsztynie.
53. Janssen M., Tramper J., Mur L.R., Wijffels R.H. 2003. *Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects*. Biotechnol. Bioeng., 81: 193–210.
54. Kadłubowska J. K. 1975. *Zarys algologii*. PWN Warszawa.
55. Kadłubowska J. Z. 1984. *Chlorophyta VII. Conjugatophyceae I. Zygnematales*. W: Ettl H., Gerloff G., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer, Stuttgart, 16: 532.
56. Kadłubowska J.Z. 1972. *Flora słodkowodna Polski, Chlorophyta V, Conjugales, Zygnematales*. W: Starmach K., Siemińska J. (red.), Flora Słodkowodna Polski PWN, Kraków, 12A: 432.
57. Kaewpintong K., Shotipruk A., Powtongsook S., Pavasant P. 2007. *Photoautotrophic high-density cultivation of vegetative cells of Haematococcus pluvialis in airlift bioreactor*. Bioresource Technol., 98: 288–295.
58. Kawecka B., Eloranta P.V. 1994. *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*. PWN Warszawa.
59. Klocke M., Mahnert P., Mundt K., Souidi K., Linke B. 2007. *Microbial community analysis of a biogas-producing completely stirred tank reactor fed continuously with fodder beet silage as mono-substrate*. Systematic and Applied Microbiology, 30: 139–151.
60. Klosowski S., Klosowski G. 2006. *Rośliny wodne i bagienne*. Multico Oficyna Wydawnicza. Warszawa.
61. Komárek J., Anagnostidis K. 1986. *Modern approach to the classification system of cyanophytes. 2 – Chroococcales*. Algological Studies, 43: 157–226.
62. Komárek J., Anagnostidis K. 1989. *Modern approach to the classification system of cyanophytes. 4 – Nostocales*. Algological Studies, 56: 247–345.
63. Komárek J., Anagnostidis K. 1999. *Cyanoprokaryota. Chroococcales*. W: Ettl H., Gärtner G., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer, Jena, Stuttgart, Lubeck, Ulm, 19(1): 548.
64. Komárek J., Fott B. 1983. *Das Phytoplankton des Süßwassers. Systematik und Biologie. Chlorophyceae (Grünalgen), Ordnung: Chlorococcales*. W: Elster H. J., Ohle W. (red.), *Die Binnengewässer. Einzeldarstellungen aus der Limnologie und ihren Nachbargebieten*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, XVI, 7(1): 1044.
65. Krammer K., Lange-Bertalot H. 1988. *Bacillariophyceae: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa., VEB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 2(2): 596.
66. Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991a. *Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. W: Ettl H., Gerloff J., G., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa., VEB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 2(3): 576.
67. Krammer K., Lange-Bertalot H. 1991b. *Bacillariophyceae: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema Gesamtliteraturverzeichnis*. W: Ettl H., Gärtner G., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa, VEB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 2(4): 434.
68. Krammer K., Lange-Bertalot H., 1986. *Bacillariophyceae: Naviculeaceae*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa, VEB Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 2(1): 876.

69. Kruk-Dowgiałło L., Michałek-Pogorzelska M., Dubiński M., Brzeska P., Opiola R., Kuliński M., Osowiecki A., Błęska M. 2010. *Przewodniki metodyczne do badań terenowych i analiz laboratoryjnych elementów biologicznych wód przejściowych i przybrzeżnych*. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa 2010.
70. Krzemieniewski M., Dębowski M., Zieliński M. 2009a. *Glony jako alternatywa dla lądowych roślin energetycznych*. *Czysta Energia*, 9: 25–27.
71. Krzemieniewski M., Mielcarek M., *Badania nad zastosowaniem wybranych makrofitów w procesie fermentacji metanowej*. *Rocznik Ochrona Środowiska* 2013 (w druku)
72. Krzemieniewski M., Zieliński M., Dębowski M. 2007. *Biomasa wodna jako źródło energii odnawialnej*. *Czysta Energia*, 12(74): 18–19.
73. Lee Y.K. 2001. *Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential*. *J. Appl. Phycol.*, 13: 307–315.
74. Li X., Li L., Zheng M., Fu G., Saifullah Lar J. 2009b. *Anaerobic co-digestion of cattle manure with corn stover pretreated by sodium hydroxide for efficient biogas production*. *Energy Fuels*, 23(9): 4635–4639.
75. Li Y., Horsman M., Wu N., Lan C., Dubois-Calero N. 2008. *Biofuels from microalgae*. *Biotechnology Progress*, 24(4): 815–820.
76. Luścińska M., Oleksowicz A.S. 1984. *Volumes of algae cells of the most frequent occurrence in 16 lakes in Pomeranian District*. *Acta Univer. Nicolai Copernici.*, 14, 57, 45–56.
77. Mata-Alvarez J., Macé S., Llabrés P. 2000. *Anaerobic digestion of organic solid wastes*. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresour. Technol.*, 74(1): 3–16.
78. Matsui T., Koike Y. 2010. *Methane fermentation of a mixture of seaweed and milk at a pilot-scale plant*. *J. Biosci. Bioeng.*, 110(5): 558–563.
79. McKendry P. 2002a. *Energy production from biomass (part 2): conversion technologies*. *Bioresource Technology*, 83(1): 47–54.
80. McKendry P. 2002b. *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*. *Bioresource Technology*, 83(1): 55–63.
81. Melis A. 2002. *Green alga hydrogen production: progress, challenges and prospects*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(11–12): 1217–1228.
82. Miao X., Wu Q. 2004. *High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides**. *Journal of Biotechnology*, 110(1): 85a.
83. Miao X., Wu Q., Yang C. 2004. *Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels*. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2): 855–863b.
84. Miller D.H., Miller M., Lampert D.T.A. 1972. *Hydroxyproline heterooligosaccharides in *Chlamydomonas**. *Science*. 176: 918–920.
85. Minowa T., Sawayama S. 1999. *A novel microalgal system for energy production with nitrogen cycling*. *Fuel*, 78(10): 1213–1215.
86. Minowa T., Yokoyama S.-Y., Kishimoto M., Okakura T. 1995. *Oil production from algal cells of *Dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction*. *Fuel*, 74(12): 1735–1738.
87. Miura Y., Akano T., Fukatsu K., Miyasaka H., Mizoguchi T., Yagi K. 1995. *Hydrogen production by photosynthetic microorganisms*. *Energy Conversion and Management*, 36(6–9): 903–906.
88. Moorhead K., Nordstedt, R. 1993. *Batch anaerobic digestion of wates hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content, and inoculum volume*. *Bioresource Technology*. 44, 71–76.
89. Mrozińska-Webb T. 1969. *Chlorophyta IV. Oedogoniales – Edogoniowe*. W: Starmach K.. *Flora Ślaskowodna Polski*. PWN Kraków, 11: 660.
90. Mussnug J.H., Klassen V., Schluter A., Kruse O. *Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept*. *Journal of Biotechnology*, 150(1): 51–56.
91. Nakano Y., Urade Y., Urade R., Kitaoka S. 1987. *Isolation, purification and characterization of the pellicle of *Euglena gracilis**. *Journal of Biochemistry*. 102: 1053–1063.
92. Olguin E.J. 2000. *The cleaner production strategy applied to animal production*. In: Olguin E.J., Sánchez G., Hernández E. 2000. *Environmental biotechnology and cleaner bioprocesses*. London: Taylor and Francis, 107–121.
93. Parkin G.F., Owen W.F. 1986. *Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges*. *J. Environ. Eng.*, 112(5): 867–920.



94. Parmar A., Singh N.K., Pandey A., Gnansounou E., Madamwar D. 2011. *Cyanobacteria and microalgae: A positive prospect for biofuels*. *Bioresource Technology*, 102(22): 10163–10172.
95. Patil V., Tran K.-Q., Giselrad H.R. 2008. *Towards sustainable production of biofuels from microalgae*. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(7): 1188–1195.
96. Phang S.M., Miah M.S., Yeoh B.G., Hashim M.A. 2000. *Spirulina cultivation in digested sago starch factory wastewater*. *Journal of Applied Phycology*, 12(3): 395–400.
97. Pienkos P., Darzins A. 2009. *The promise and challenges of microalgal-derived biofuels*. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, 3(4): 431–440.
98. Popovský J., Pfiester L.A. 1990. *Dinophyceae (Dinoflagellida)*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D., (red.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, 6: 272.
99. Prescott G.W. 1970. *Algae of the western Great Lakes Area*. W.M. C. Brown Company Publishers, Duboqu, Iowa: 977s.
100. Pulz O. 2001. *Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 57: 287–293.
101. Qin B. 2009. *Lake eutrophication: control countermeasures and recycling exploitation*. *Ecol. Eng.*, 35(11): 1569–1573.
102. Qin J. 2005. *Bio-hydrocarbons from algae-impacts of temperature, light and salinity on algae growth*. Barton, Australia: Rural Industries Research and Development Corporation.
103. Ras M., Lardon L., Bruno S., Bernet N., Steyer J.-P. 2010. *Experimental study on a coupled process of production and anaerobic digestion of Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 102: 200–206.
104. Razon L.F., Tan R.R. 2011. *Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: Haematococcus pluvialis and Nannochloropsis*. *Applied Energy*, doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.052
105. Rittmann B.E. 2008. *Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms*. *Biotechnology and Bioengineering*, 100: 203–212.
106. Samson R., Leduy A. 1982. *Biogas production from anaerobic digestion of Spirulina maxima algal biomass*. *Biotechnol. Bioeng.*, 24(8): 1919–1924.
107. Samson R., Leduy A. 1985. *Multistage continuous cultivation of bluegreen alga Spirulina maxima in the flat tank photobioreactors*. *Can. J. Chem. Eng.*, 63: 105–112.
108. Samson R., Leduy A. 1986. *Detailed study of anaerobic digestion of Spirulina maxima algal biomass*. *Biotechnology and Bioengineering*, 28: 1014–1023.
109. Sanchez Miron A., Ceron Garcia M.C., Garcia Camacho F., Molina Grima E., Chisti Y., 2002. *Growth and characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: studies in fed-batch culture*. *Enzyme Microb. Technol.*, 31: 1015–1023.
110. Schlüter A., Bekel T., Diaz N.N., Dondrup M., Eichenlaub R., Gartemann K.H., Krahn I., Krause L., Kromeke H., Kruse O., Mussgnug J.H., Neuweger H., Niehaus K., Puhler A., Runte K.J., Szczepanowski R., Tauch A., Tilker A., Viehover P., Goesmann A. 2008. *The metagenome of a biogas-producing microbial community of a production-scale biogas plant fermenter analysed by the 454-pyrosequencing technology*. *Journal of Biotechnology*, 136: 77–90.
111. Seppälä, M., Paavola, T., Lehtomäki, A., Rintala, J. 2009, *Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare*. *Bioresource Technology*. 100 (12), 2952–2955.
112. Sheffer M., Fried A., Gottlieb H.E., Tietz A., Avron M. 1986. *Lipid composition of the plasma-membrane of the halotolerant alga, Dunaliella salina*. *Biochimica et Biophysica Acta*. 857: 165–172.
113. Sialve B., Bernet N., Bernard O. 2009. *Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel*. *Sustainable. Biotechnol. Adv.*, 27(4): 409–416.
114. Siemińska J. 1964. *Chrysophyta II. Bacillariophyceae – okrzemki*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa, 6: 608.
115. Singh J., Gu S. 2010. *Commercialization potential of microalgae for biofuels production, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 2596–2610.
116. Singh N., Dhar D. 2011. *Microalgae as second generation biofuel. A review*. *Agron. Sustain. Dev.*, 31(4): 605–629.

117. Skjanesa K., Knutsena G., Kllqvistb T., Lindblad P. 2008. *H<sub>2</sub> production from marine and freshwater species of green algae during sulfur deprivation and considerations for bioreactor design*. International Journal of Hydrogen Energy, 33: 511–521.
118. Starmach K. 1963. *Rośliny słodkowodne. Wstęp ogólny i zakres metod badania*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa: 270.
119. Starmach K. 1966. *Cyanophyta, Glaucophyta*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa, 2: 807.
120. Starmach K. 1968a. *Chrysophyta I: Chrysophyceae – Złotowiciowce oraz wiciowce bezbarwne – Zooflagellata wolnożyjące*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa, 5: 598.
121. Starmach K. 1968b. *Chrysophyta III: Xantophyceae – Różnowiciowe*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa, 7: 394.
122. Starmach K. 1972. *Chlorophyta III. Zielenice nitkowate: Ulothrichales, Ulvales, Prasiolales, Sphaeropleales, Cladophorales, Chaetophorales, Trentepohliales, Siphonales, Dichotomosiphonales*. W: Starmach K., Siemińska J. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa-Kraków, 10: 750.
123. Starmach K. 1974. *Cryptophyceae – Kryptofity, Dinophyceae – Dinofity, Raphidophyceae – Rafidofity*. W: Starmach K. (red.), *Flora słodkowodna Polski*. PWN Warszawa-Kraków, 4: 519.
124. Starmach K. 1983. *Euglenophyta – Eugleniny*. W: Starmach K., Siemińska J. (red.) *Flora Słodkowodna Polski*. PWN, Warszawa-Kraków: 563.
125. Starmach K. 1985. *Chrysophyceae und Haptophyceae*. W: Ettl H., Gerloff J., Heynig H., Mollenhauer D. (red.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 1: 516.
126. Starmach K. 1989. *Plankton roślinny wód słodkowodnych. Metody badania i klucze do oznaczania gatunków występujących w wodach Europy Środkowej*. PWN Warszawa-Kraków: 496.
127. Stephens E., Ross I.L., King Z., Mussgnug J.H., Kruse O., Posten C., Borowitzka M.A., Hankamer B. 2010. *An economic and technical evaluation of microalgal biofuels*. Nature Biotechnology, 28: 126–128.
128. Takeda H. 1991. *Sugar composition of the cell wall and the taxonomy of Chlorella (Chlorophyceae)*. Journal of Phycology, 27: 224–232.
129. Takeda H. 1996. *Cell wall sugars of some Scenedesmus species*. Phytochemistry, 42: 673–675.
130. Tamburic B., Zemichael F.W., Maitland G.C., Hellgardt K. 2011. *Parameters affecting the growth and hydrogen production of the green alga Chlamydomonas reinhardtii*. International Journal of Hydrogen Energy, 36: 7872–7876.
131. Tredici M.R. 1999. *Bioreactors*, photo. In: Flickinger M.C.D. (Ed.), *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation*. Wiley, New York.
132. Ueno Y., Kurano N., Miyachi S. 1998. *Ethanol production by dark fermentation in the marine green alga, Chlorococcum littorale*. Journal of Fermentation and Bioengineering, 86(1): 38–43.
133. van Eykelenburg C., Fuchs A., Schmidt G.H. 1980. *Some theoretical considerations on the in vitro shape of the cross-walls in Spirulina spp*. Journal of Theoretical Biology. 82: 271–282.
134. Vergara-Fernandez A., Vargas G., Alarco'n N., Antonio A. 2008. *Evaluation of marine algae as a source of biogas in a two-stage anaerobic reactor system*. Biomass and Bioenergy, 32: 338–344.
135. Vijayaraghavan K., Rajendran Karthik S.P., Nalini K. 2009. *Hydrogen production by Chlamydomonas reinhardtii under light driven sulfur deprived conditio*. International Journal of Hydrogen Energy, 34: 7964–7970.
136. West W.W., West G.S. 1971a. *A monograph of the British Desmidiaceae*. Jonson Reprint Corporation, New York, London, 1: 224.
137. West W.W., West G.S. 1971b. *A monograph of the British Desmidiaceae*. Jonson Reprint Corporation, New York, London, 2: 202.
138. West W.W., West G.S. 1971c. *A monograph of the British Desmidiaceae*. Jonson Reprint Corporation, New York, London, 3: 274.
139. West W.W., West G.S. 1971d. *A monograph of the British Desmidiaceae*. Jonson Reprint Corporation, New York, London, 4: 191.
140. West W.W., West G.S. 1971e. *A monograph of the British Desmidiaceae*. Jonson Reprint Corporation, New York, London, 5: 300.

141. Winkler M., Hemschemeier A., Gotor C., Melis A., Happe T. 2002. *[Fe]-hydrogenases in green algae: photo-fermentation and hydrogen evolution under sulfur deprivation*. International Journal of Hydrogen Energy, 27: 1431–1439.
142. Wise D.L., Augenstein D.C., Ryther J.H. 1979. *Methane fermentation of aquatic biomass*. Resour. Recovery Conserv., 4(3): 217–237.
143. Wu W.-T., Hsieh C.-H. 2008. *Cultivation of microalgae for optimal oil production*. Journal of Biotechnology, 136(1): 521–1521.
144. Wu X., Yao W., Zhu J., Miller C. 2010. *Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source*. Bioresour. Technol., 101(11): 4042–4047.
145. Yen H.-W., Brune D.E. 2007. *Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane*. Bioresource Technology, 98(1): 130–134.
146. Yuan X.Z., Shi X.S., Zhang D.L., Qiu Y.L., Guo R.B., Wang L.S. 2011. *Biogas production and microcystin biodegradation in anaerobic digestion of blue algae*. Energy Environ. Sci., 4(4): 1511–1515.
147. Zamalloa C., Boon N., Verstraete W. 2012. *Anaerobic digestibility of Scenedesmus obliquus and Phaeodactylum tricornutum under mesophilic and thermophilic conditions*. Applied Energy, 92: 733–738.
148. Zamalloa, C., Vulsteke, E., Albrecht, J. Verstraete, W. 2011. *The techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae*. Bioresource Technology, 102: 1149–1158.
149. Zeng S.J., Yuan X.Z., Shi X.S., Qiu Y.L. 2010. *Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of Microcystis spp.* J. Hazard. Mater., 178(1–3): 89–93.
150. Zhong W., Zhongzhi Zhang, Yijing Luo, Wei Qiao, Meng Xiao, Min Zhang. 2012. *Biogas productivity by co-digesting Taihu blue algae with corn straw as an external carbon source* State Key. Bioresource Technology (w druku).



# EFEKTYWNE METODY KONSERWACJI BIOMASY Z CELOWYCH UPRAW ENERGETYCZNYCH

Autorzy:  
Cezary Purwin  
Barbara Pysera  
Maja Fijałkowska  
Jan Tywończuk

## 1. Wstęp

Zapewnienie ciągłej podaży biomasy dla scentralizowanych biogazowni wiąże się z poszukiwaniem surowców roślinnych oraz metod ich przechowywania. Pozwoli to na uzyskanie biomasy roślinnej o określonym składzie chemicznym, wartości kalorycznej, podatności na rozkład bakteryjny przy jednoczesnym uwzględnieniu kosztów produkcji [12].

Tanim i sprawdzonym sposobem konserwowania i przechowywania surowców roślinnych na cele paszowe jest kiszenie. Wymaga on jednak ciągłego doskonalenia, a także adaptacji do przechowywania biomasy w celach energetycznych. Z nielicznych danych [1] wynika, że wydajność metanu z 1 kg kiszonki może być wyższa aniżeli z surowca zielonego, z którego została wyprodukowana. Istnieją także przesłanki wskazujące, że wydłużenie czasu przechowywania kiszonek może zwiększać wydajność biogazu uzyskiwaną z 1 kg suchej masy [18]. Jednak procesowi kiszenia zawsze towarzyszą straty zawartej w nich energii – związane z oddychaniem tlenowym, fermentacją, ewentualnym wyciekami soków. Największym jednak problemem nie tylko w Polsce jest stabilność tlenowa kiszonek (oporność kiszonki na rozkład tlenowy i zagrzewanie) [8]. Straty energii wynikające z rozkładu tlenowego substancji organicznej mogą mieć największy wymiar (do 40% energii brutto) i zachodzą w trakcie przechowywania i wybierania kiszonek [4, 9]. Ryzyko uzyskiwania kiszonek niestabilnych wiąże się z zakiszaniem surowców zbieranych w późnych fazach wegetacji, o wysokiej zawartości suchej masy, węglowodanów oraz cechach fizycznych pogarszających ugniatanie biomasy [14]. Aktualne poglądy nad zwiększeniem stabilności kiszonek dotyczą stosowania dodatków chemicznych i biologicznych w czasie zakiszania. Kryteria doboru tych preparatów do zakiszania surowców roślinnych na cele paszowe są stosunkowo dobrze poznane. Brak jest natomiast danych w odniesieniu do

zakiszania biomasy na cele energetyczne. Dotychczasowe opracowania zagraniczne dotyczące przechowywania biomasy z przeznaczeniem do produkcji biogazu odnoszą się głównie do kukurydzy oraz w mniejszym stopniu do sorga i zbóż drobnoziarnistych [1, 2, 15, 18, 23]. W warunkach krajowych brak jest tego typu opracowań.

Podjęte badania miały na celu wskazanie rodzajów biomasy najbardziej przydatnych do ciągłego wykorzystania jako surowca do produkcji biogazu z rodzimych oraz introdukowanych gatunków roślin energetycznych. Jako kryteria oceny przyjęto wielkość strat energii w zależności od długości okresu przechowywania, skuteczność działania dodatków na poszczególne rodzaje biomasy, jej stabilność tlenową, wydajność biogazową oraz koszty przechowywania.

## 2. Metodyka

Badania nad konserwacją biomasy prowadzono w skali laboratoryjnej (2009–2010) i półtechnicznej (2010–2011). W skali laboratoryjnej wykorzystano 7 rodzajów biomasy roślinnej: koniczyna czerwona, lucerna siewna, kukurydza w dojrzałości mleczno-woskowej (I faza) i włoskiej (II faza), sorgo cukrowe, miskant cukrowy, miskant olbrzymi. Biomase kukurydzy, sorgo, miskanta cukrowego i olbrzymiego zbierano sieczkarnią samobiezną. Natomiast koniczynę czerwoną i lucernę siewną zbierano kosiarką i podsuszano przez 24 godz. na pokosach. Wszystkie rodzaje biomasy rozdrabniano sieczkarnią elektryczną o teoretycznej długości sieczki 10–12 mm.

Tabela 2.1  
Dodatki stosowane do konserwowania biomasy (skala laboratoryjna)

Wariant	Rodzaj dodatku	Dawka na kg <sup>-1</sup> świeżej masy
O	bez dodatków – kontrolna	–
A	kwasy mrówkowy – 96%	5 g
B	inokulant: <i>L. plantarum</i> KKP/593/P, <i>L. plantarum</i> KKP/788/P, <i>L. brevis</i> KKP 839, <i>L. buchneri</i> KKP 907 1×10 <sup>9</sup> /g	0,005 g (5×10 <sup>7</sup> CFU)
C	bakteryjno-enzymatyczny: <i>L. plantarum</i> KKP/593/P, <i>L. plantarum</i> KKP/788/P, <i>L. brevis</i> KKP 839, <i>L. buchneri</i> 907, endo 1,4 beta-glukanaza 100 JCMC, endoksyłanaza 100 JX	0,005 g (5×10 <sup>7</sup> CFU)
D <sub>1</sub>	enzymatyczny: beta-glukanaza 300 JCMC, endoksyłanaza 300 JX, glukozylaza 1500 JGA	0,004 g
D <sub>2</sub>	enzymatyczny: hemicelulaza i celulaza 94 I.U.	0,004 g

Rozdrobnioną biomasę umieszczono w mikrosilosach plastikowych o pojemności 10 l, uszczelnionych silikonem, zaopatrzonych w zawór odprowadzający gazy fermentacyjne. Każdą próbę wykonywano w trzech powtórzeniach. Po ubiciu mikrosilosy ważono w celu osiągnięcia identycznego stopnia zagęszczenia danego rodzaju biomasy. Każdy rodzaj biomasy przechowywano w 6 wariantach (tabela 2.1).

Skala półtechniczna (tabela 2.2) obejmowała wybrane warianty konserwowania (biomasa bez dodatku oraz z jednym rodzajem dodatku wytypowanym na podstawie badań laboratoryjnych). Biomasę konserwowano w przyrządach  $2\text{ m} \times 4\text{ m} \times 1\text{ m}$ , (wszystkie rodzaje) oraz balotach cylindrycznych (koniczyna czerwona, lucerna).

Tabela 2.2

Warianty konserwowania biomasy w skali półtechnicznej

Rodzaj biomasy	Składowanie	Kontrolna	Dodatek
Koniczyna czerwona	balot/pryzma	O	D <sub>1</sub>
Lucerna siewna	balot/pryzma	O	C
Kukurydza	pryzma	O	B
Sorgo cukrowe	pryzma	O	D <sub>2</sub>
Miskant cukrowy	pryzma	O	D <sub>2</sub>
Miskant olbrzymi	pryzma	O	D <sub>2</sub>

Analiza chemiczna i kalorymetryczna biomasy obejmowała: podstawowy skład chemiczny wg standardowych metod [3], zawartość cukrów rozpuszczalnych w wodzie WSC metodą antronową [22], frakcje cukrowców strukturalnych (NDF, ADF i ADL) metodą Van Soesta i in. [24] przy użyciu aparatu ANKOM 220. Analizowano świeżą biomasę oraz próbki kiszonek (60, 180, 360 dni przechowywania) po otwarciu zbiornika i dokładnym wymieszaniu zawartości. Kwasowość kiszonej biomasy określono pehametrem HI 8314. Próbkę biomasy podsuszano w podsuszarce firmy Binder FED 115 i rozdrabniano młynem do surowców włóknistych firmy Retsh SK 100.

Straty energii podczas przechowywania obliczono na podstawie różnicy między masą surowca umieszczonego w mikrosilosie przed zamknięciem i masą po 60 i 180 dniach przechowywania biomasy oraz ciepła spalania 1 g świeżej i przechowywanej biomasy (Kalorymetr IKA C 2000).

Ponadto oceniano stabilność tlenową (oporność na rozkład tlenowy) konserwowanej biomasy poprzez określenie strat ciepła spalania wg metodyki Honiga [13]. Polegały one na pomiarze ubytku ciepła spalania biomasy przed i po 7-dniowej inkubacji tlenowej w temperaturze 20°C i wilgotności 95%.

Próbki biomasy o masie odpowiadającej 100 g suchej masy umieszczono w pojemnikach plastikowych o średnicy 100 mm z otworami w dnie i pokrywą o średnicy 10 mm.

Badania potencjału biogazowego w przechowywanej biomase przeprowadzono w Katedrze Inżynierii Ochrony Środowiska. Biomase rozdrabniano mechanicznie za pomocą młynka tnącego ROBO 3000 do średniego wymiaru cząstek 2–3 mm. Pomiary respirometryczne przeprowadzono za pomocą zestawów Oxi-Top Control firmy WTW. Ilość wsadu poszczególnych rodzajów biomasy do pomiarów respirometrycznych obliczono na podstawie zawartej w nich suchej masy (s.m.) oraz suchej masy organicznej (s.m.o.). Pomiary prowadzono przy temperaturze 35°C, czas pomiaru wynosił 40 dni. Zestawy zaszczipione były osadem pochodzącym z reaktora beztlenowego wpracowanego do rozkładu substratu roślinnego. Osad był „przełódzony” przed prowadzeniem pomiarów respirometrycznych. Zawartość metanu w biogazie wyrażono w procencie objętościowym (% v/v). Ilość wytworzonego biogazu i metanu podano w wartościach znormalizowanych, tj. w litrach normalnych ( $I_N$ ) na kg s.m.o. Znormalizowana jednostka objętości gazu  $I_N$  lub  $m^3$  w warunkach normalnych tj. ciśnienie = 1013,25 mbar, temperatura = 0°C, wilgotność = 0% (gaz suchy).

Do obliczenia kosztów konserwowania w technologii przyzmy naziemnej przyjęto koszt transportu z pola, podgarniania i rozgarniania biomasy na przyzmy, ubijania, koszt folii do zakiszania, załadunku kiszonki, transport do miejsca odbioru. Koszty konserwowania w technologii bel cylindrycznych obejmowały: koszt belowania prasą, załadunku bel na polu, transportu z pola, koszt folii do owijania, załadunku bel w miejscu składowania kiszonki, transportu do miejsca odbioru. Do obliczeń przyjęto następujące założenia: średnia odległość z pola do miejsca składowania biomasy – 1 km, odległość z miejsca składowania biomasy do odbiorcy (biogazowni) – 1 km, warunki składowania biomasy w przyzmach – na powierzchni utwardzonej, przykryta podwójnie folią oraz przygnięciona oponami, warunki składowania w belach cylindrycznych na powierzchni nieutwardzonej, owinięte dwiema warstwami folii. Koszty dodatków do zakiszania przyjęto na podstawie aktualnych cen hurtowych oraz wielkości dawki stosowanej w badaniach.

Koszt transportu i zakiszania dla poszczególnych rodzajów biomasy obliczono, przyjmując następujące plony świeżej masy ( $t \cdot ha^{-1}$ ): kukurydzy zwykłej – 68,26, sorga cukrowego – 52,40, koniczyny czerwonej – 55,20, lucerny – 58,60, miskanta olbrzymiego – 43,85, miskanta cukrowego – 28,60. Jako koszt przechowywania przyjęto wyrażoną w PLN wartość strat energii (ciepła spalania) obliczoną na podstawie % wielkości strat w czasie 180 dni przechowywania z sumy kosztów produkcji świeżej biomasy, kosztów konserwowania i dodatków do zakiszania.



Uiszeregowania testowanych surowców roślinnych do ciągłej produkcji biogazu dokonano na podstawie następujących kryteriów: wielkość strat energii podczas przechowywania biomasy bez dodatków przez 180 dni (straty), podatność biomasy na zastosowane dodatki konserwujące w celu ograniczenia strat energii (dodatki), wydajność biogazu z poszczególnych rodzajów przechowywanej biomasy (wydajność biogazu), wielkość strat energii w czasie inkubacji tlenowej biomasy po otwarciu zbiornika (stabilność tlenowa), łączny koszt przechowywania biomasy mierzony w zł (koszty). W każdej ocenianej kategorii poszczególnym rodzajom biomasy przyznano od 1 do 6 punktów.

### 3. Wyniki

#### 3.1. Skład chemiczny i wartość energetyczna świeżej biomasy przed przechowywaniem

Surowce roślinne stanowiące przedmiot badań nad przechowywaniem biomasy różniły się znacznie składem chemicznym (tabela 3.1). Zawartość suchej masy w biomacie dedykowanych roślin energetycznych (kukurydza, sorgo cukrowe, miskant cukrowy, miskant olbrzymi) konserwowanych bezpośrednio po zbiorze wynosiła od 17,8 w biomacie sorga cukrowego do 39,0% w biomacie miskanta cukrowego. Odrębnym składem chemicznym charakteryzowała się biomasa roślin motylkowatych.

Tabela 3.1  
Skład chemiczny i ciepło spalania ( $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.) testowanych surowców roślinnych przed konserwowaniem (% s.m.)

Składnik	Koniczyna czerwona	Lucerna siewna	Kukurydza I faza	Kukurydza II faza	Sorgo cukrowe	Miskant cukrowy	Miskant olbrzymi
s.m. %	39,3	27,8	25,0	28,5	17,8	39,0	27,0
s.m.o.	91,7	90,0	96,0	95,8	94,7	96,6	96,0
BO	18,6	19,8	6,12	7,41	9,23	6,10	7,34
TS	1,42	1,19	1,37	1,47	1,33	0,98	1,44
BAW	43,9	38,3	58,6	60,8	54,4	52,1	52,7
WSC	8,97	5,40	16,8	10,6	22,5	6,20	6,99
NDF	42,3	53,7	59,8	58,0	58,8	75,5	71,4
ADF	35,0	41,1	33,2	30,9	35,0	43,8	41,0
ADL	5,36	8,89	3,07	2,97	3,62	6,30	5,98
EB	18,5	18,7	16,9	17,9	17,9	18,2	18,4

s.m. – sucha masa; s.m.o. – sucha masa organiczna; BO – białko ogólne; TS – tłuszcz surowy; BAW – związki bezazotowe wyciągowe; WSC – cukry rozpuszczalne w wodzie; NDF – włókno neutralno-detergentowe; ADF – włókno kwaśno-detergentowe; ADL – kwaśna lignina; EB – energia brutto

Biomasa lucerny i koniczyny czerwonej zawierała odpowiednio 27,8% i 39,3% suchej masy, co wynikało z podsuszenia jej na pokosach. Surowce te zawierały najmniej substancji organicznej, cukrów rozpuszczalnych w wodzie, natomiast najwięcej związków azotowych 19,8 i 18,6% s.m. odpowiednio w biomacie lucerny i koniczyny czerwonej.

Zawartość suchej substancji organicznej w biomacie pozostałych roślin energetycznych była zbliżona i wahała się od 94,7% w sorgo do 96,6% w miskancie cukrowym. Rośliny te charakteryzowały się także małym zróżnicowaniem w zawartości związków azotowych (od 6,12% w kukurydzy II faza do 9,23% w sorgo).

Największe zróżnicowanie odnotowano w zawartości węglowodanów strukturalnych. Najniższy poziom włókna neutralno-detergentowego (NDF – suma celulozy, hemicelulozy, pektyn, pentozanów, ligniny) stwierdzono w biomacie koniczyny czerwonej, natomiast najwyższy udział tej frakcji węglowodanów odnotowano w biomacie miskanta cukrowego (75,5% s.m.) i olbrzymiego (71,4% s.m.).

Frakcja cukrowców strukturalnych określana jako włókno kwaśno-detergentowe (ADF), składająca się głównie z celulozy i ligniny, w najniższej koncentracji występowała w biomacie kukurydzy zbieranej w I fazie dojrzałości (30,9% s.m.), natomiast w najwyższej – w biomacie miskanta cukrowego (43,8% s.m.). Zawartość ADL była najniższa w biomacie kukurydzy i sorga (2,97–3,62% s.m), natomiast najbardziej zdrewniała okazała się biomasa lucerny (8,89% ADL).

### **3.2. Skład chemiczny oraz straty energii w czasie przechowywania biomasy różnych gatunków**

Zawartość suchej masy w biomacie przechowywanej 60 dni była zbliżona do poziomu tego składnika w biomacie świeżej (tabela 3.2). Przechowywanie między 60 a 180 dniem spowodowało obniżenie zawartości suchej masy we wszystkich rodzajach biomasy poza miskantem cukrowym i miskantem olbrzymim. Wydłużenie okresu przechowywania kiszonej biomasy ze 180 do 360 dni obniżyło zawartość suchej masy we wszystkich gatunkach poza sorgiem, przy czym spadek zawartości suchej masy był najwyższy w tych surowcach, które zachowały najwięcej suchej masy w pierwszych 180 dniach przechowywania.

Obniżeniu zawartości suchej masy w przechowywanych surowcach roślinnych towarzyszył nieznaczny spadek koncentracji suchej substancji organicznej. Był on największy w biomacie lucerny i koniczyny czerwonej. Stwierdzone w tych rodzajach biomasy wysokie pH wskazuje na wadliwy przebieg fermentacji (fermentacja wtórna) w czasie przechowywania. W pozostałych rodzajach biomasy stopień zakwaszenia był właściwy lub zadowalający. Wszystkie rodza-

je biomasy po 180 i 360 dniach przechowywania zawierały jedynie śladowe ilości cukrów rozpuszczalnych w wodzie, czyli frakcji węglowodanów najłatwiej ulegającej fermentacji.

Tabela 3.2  
Skład chemiczny (% s.m.) i odczyn biomasy z różnych roślin przechowywanej 60, 180, 360 dni

Czas (dni)	Składnik	Koniczyna	Lucerna	Kukurydza I faza	Kukurydza II faza	Sorgo cukrowe	Miskant cukrowy	Miskant olbrzymi
60	s.m. (%)	39,8	23,4	24,7	30,5	17,2	38,6	27,0
	s.m.o.	91,4	89,9	96,1	95,5	94,3	96,5	96,1
	WSC	0,95	1,22	3,10	1,87	5,62	2,94	5,10
	NDF	44,0	60,4	60,8	63,0	55,9	72,4	69,8
	pH	5,81	6,16	4,21	4,28	4,31	4,47	5,21
180	s.m. (%)	38,3	22,5	21,2	29,5	16,5	38,7	26,5
	s.m.o.	90,3	88,5	95,4	96,0	93,3	96,2	96,1
	WSC	0,33	0,22	1,06	1,27	1,35	0,61	0,31
	NDF	45,7	60,0	58,1	59,4	60,8	70,2	67,8
	pH	6,12	6,34	4,27	4,47	4,25	4,82	5,06
360	s.m. (%)	36,1	20,6	20,1	26,5	16,3	35,7	22,4
	s.m.o.	89,4	85,1	95,3	95,7	93,3	94,3	95,8
	WSC	0,24	0,12	0,85	1,16	1,37	0,73	0,30
	NDF	47,1	62,3	56,3	58,7	61,7	72,3	71,7
	pH	6,62	7,44	4,39	4,52	4,21	4,95	5,35

s.m. – sucha masa; s.m.o. – sucha masa organiczna; WSC – cukry rozpuszczalne w wodzie; NDF – włókno neutralno-detergentowe

Straty wyrażone w energii brutto po 60 i 180 dniach przechowywania biomasy w zależności od rodzaju biomasy przedstawiono w tabeli 3.3. Porównanie strat energii wyrażonej ciepłem spalania podczas 60 dni przechowywania biomasy z upraw dedykowanych, konserwowanych bez dodatków wspomagających fermentację (O) wykazało najmniejsze straty w biomasie kukurydzy w II fazie dojrzałości, miskanta cukrowego, koniczyny czerwonej (4,39–4,92%) a najwyższe w biomasie z lucerny (12,9%).

Wydłużenie okresu przechowywania biomasy w mikrosilosach do 180 dni wpłynęło na wzrost wymiaru strat energii brutto, jednakże zmiany te nie były proporcjonalne do długości okresu przechowywania. Największy wzrost strat odnotowano w przypadku biomasy koniczyny czerwonej, kukurydzy w fazie mleczno-woskowej oraz sorga. Natomiast w najmniejszym stopniu straty energii w trakcie przechowywania między 60 a 180 dniem wzrosły w odniesieniu do biomasy kukurydzy (II) zbieranej w dojrzałości wiosennej oraz miskantów cukrowego i olbrzymiego.

Wpływ zastosowanych dodatków na wielkość strat w trakcie przechowywania poszczególnych rodzajów biomasy przedstawiono w tabeli 3.3.

Straty energetyczne podczas przechowywania biomasy z obu roślin motylkowatych były zróżnicowane. W trakcie przechowywania koniczyny czerwonej zaobserwowano niskie straty do 60 dnia. W okresie tym nie zaobserwowano znacznego wpływu dodatków na ograniczenie strat energetycznych.

Tabela 3.3

Straty energii (%) podczas przechowywania biomasy z dodatkami

Rodzaj biomasy	Czas (dni)	O*	A*	B*	C*	D <sub>1</sub> *	D <sub>2</sub> *
Koniczyna czerwona	60	4,92	3,52	3,57	7,20	4,37	5,03
	180	12,3	5,97	8,11	9,21	7,16	8,88
Lucerna siewna	60	12,9	10,8	11,2	8,87	9,02	10,2
	180	15,2	10,3	14,3	8,71	9,84	14,6
Kukurydza I faza	60	7,61	3,53	3,72	4,07	8,29	8,46
	180	13,3	5,45	6,53	6,93	9,22	9,72
Kukurydza II faza	60	4,39	2,88	3,56	4,41	4,78	5,68
	180	4,55	3,90	3,64	5,62	6,24	6,17
Sorgo cukrowe	60	6,23	7,26	9,39	8,38	9,92	7,85
	180	10,4	7,82	10,6	9,29	10,3	8,36
Miskant cukrowy	60	4,83	2,52	3,22	3,56	2,85	3,75
	180	5,48	3,33	4,83	4,18	4,88	5,15
Miskant olbrzymi	60	5,94	6,89	8,29	7,00	7,10	7,90
	180	7,72	7,10	8,74	7,20	8,50	8,90

\*O – bez dodatków, A – kwas mrówkowy, B – inokulant, C – bakteryjno-enzymatyczny, D<sub>1</sub> – beta-glukanaza, endoksylnaza, glukoamylaza, D<sub>2</sub> – hemicelulaza i celulaza

W nieznacznym stopniu straty ciepła spalania ograniczył dodatek kwasu mrówkowego (A) i inokulantu (B). Natomiast dodatek bakteryjno-enzymatyczny (C) spowodował wzrost strat w pierwszych 60 dniach przechowywania koniczyny czerwonej. Uzyskane wyniki świadczą o stosunkowo niskiej pojemności buforowej zielonej biomasy koniczyny czerwonej, a w konsekwencji niskich stratach fermentacyjnych podczas naturalnego zakwaszania biomasy. Przechowywanie biomasy lucerny powodowało znacznie wyższe straty energii mierzonej ciepłem spalania szczególnie w pierwszym okresie pomiarowym (60 dni). Każdy z zastosowanych dodatków w tym okresie ograniczył straty energii. Najskuteczniejszymi dodatkami w przypadku lucerny okazały się dodatki zawierające enzymy (C, D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>), jednak tylko C i D<sub>1</sub> zachowały skuteczność w wydłużonym do 180 dni okresie przechowywania biomasy lucerny. W przypadku stosowania pozostałych dodatków w okresie przedłużonego przechowywania nie stwierdzono ograniczenia strat energii w porównaniu z biomasą przechowywaną bez dodatków.

Poziom strat energii brutto podczas przechowywania kukurydzy różnił się w zależności od terminu zbioru, długości okresu przechowywania oraz zastosowanych dodatków. W kukurydzy zbieranej w późniejszym okresie (dojrzałość woskowa) straty energii były niższe w porównaniu do kukurydzy pochodzącej z wcześniejszego zbioru (dojrzałość mleczno-woskowa). Wydłużenie okresu przechowywania w większym stopniu wpłynęło na wzrost strat energii w biomase kukurydzy zbieranej w dojrzałości mleczno-woskowej.

W biomase kukurydzy (I faza) konserwowanej z dodatkiem kwasu mrówkowego (A), inokulanta bakteryjnego (B) oraz dodatku bakteryjno-enzymatycznego (C) po 60 dniach przechowywania stwierdzono mniejsze straty wyrażone ciepłem spalania w porównaniu do biomasy kukurydzy przechowywanej z dodatkiem obu preparatów enzymatycznych ( $D_1$  i  $D_2$ ). Jednak przyrost strat energii po wydłużeniu okresu przechowywania biomasy z dodatkiem tych preparatów był najmniejszy.

Zastosowanie dodatków w kukurydzy zbieranej w dojrzałości woskowej w mniejszym stopniu ograniczyło straty energii w czasie jej przechowywania. W przypadku tego surowca do 60 dnia najskuteczniej działał dodatek kwasu mrówkowego (A), jednak nie chronił skutecznie biomasy przed stratami w następnych 120 dniach przechowywania. Po 180 dniach przechowywania najmniejsze straty stwierdzono w biomase przechowywanej z dodatkiem inokulantu bakteryjnego (B), w biomase konserwowanej tym dodatkiem nie zaobserwowano wzrostu strat energii po wydłużeniu przechowywania.

Poziom strat energii w czasie przechowywania biomasy sorga był stosunkowo wysoki. Żaden z zastosowanych dodatków nie wpłynął na ograniczenie strat energii w czasie przechowywania tego surowca energetycznego w porównaniu z próbą kontrolną. Pozytywny wpływ dodatków zaobserwowano jedynie w czasie przechowywania przez 180 dni, jednak dotyczył on tylko kwasu mrówkowego (A) oraz dodatku bakteryjno-enzymatycznego (C) i enzymatycznego ( $D_2$ ).

Stwierdzone straty w czasie przechowywania biomasy miskanta cukrowego były niższe w porównaniu z miskantem olbrzymim, także skuteczność oddziaływania dodatków w stosunku do tych surowców była odmienna. Wszystkie zastosowane dodatki obniżyły straty energii w trakcie przechowywania biomasy miskanta cukrowego do 60 dnia przechowywania. Najskuteczniejszy w tym przypadku okazał się dodatek kwasu mrówkowego (A) oraz dodatek enzymatyczny zawierający w swoim składzie glukozylazę, endoksylianazę oraz glukozylazę ( $D_1$ ).

W przypadku przechowywania biomasy z miskanta olbrzymiego żaden z zastosowanych dodatków nie wpłynął w pierwszym okresie pomiarowym (60 dni) na ograniczenie strat energii brutto. Wydłużenie okresu przechowywania biomasy miskanta cukrowego potwierdziło skuteczność dodatków, a szczegóły

nie kwasu mrówkowego i preparatu enzymatyczno-bakteryjnego. Wymienione dodatki także w przypadku miskanta olbrzymiego powodowały minimalne ograniczenie strat po 180 dniach przechowywania.

Ocena stabilności tlenowej biomasy konserwowanej poprzez określenie strat energii w czasie tlenowej inkubacji wykazała, że najwyższe straty wystąpiły w przypadku biomasy miskanta cukrowego i olbrzymiego, natomiast najniższe w próbkach biomasy sorga, kukurydzy zbieranej we wcześniejszej fazie oraz lucerny (tabela 3.4).

Tabela 3.4  
Straty energii (%) podczas tlenowej inkubacji biomasy przechowywanej 180 dni

Rodzaj biomasy	O	A	B	C	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
Koniczyna czerwona	7,42	7,14	7,73	8,63	5,52	8,30
Lucerna siewna	3,20	3,06	2,37	3,21	6,00	4,60
Kukurydza I faza	2,90	3,44	5,62	2,17	11,7	10,5
Kukurydza II faza	5,74	3,55	3,30	6,98	12,5	11,3
Sorgo cukrowe	2,75	1,95	2,48	1,57	2,13	1,48
Miskant cukrowy	9,90	4,02	9,79	22,2	10,3	5,01
Miskant olbrzymi	9,96	5,83	10,1	10,1	13,6	4,34

\*O – bez dodatków, A – kwas mrówkowy, B – inokulant, C – bakteryjno-enzymatyczny, D<sub>1</sub> – beta-glukanaza, endoksylnaza, glukoamylaza, D<sub>2</sub> – hemicelulaza i celulaza

Straty tlenowe przekroczyły wymiar strat beztlenowych w odniesieniu do biomasy kukurydzy w późnej fazie dojrzałości, miskanta cukrowego i olbrzymiego. Skuteczność zastosowanych do przechowywania dodatków była różna w odniesieniu do poszczególnych rodzajów przechowywanej biomasy. W wielu przypadkach biomasa przechowywana z dodatkami była bardziej podatna na rozkład tlenowy niż bez dodatków. W przypadku biomasy sorga i kukurydzy zbieranej w I fazie oraz lucerny żaden z zastosowanych dodatków nie ograniczył strat związanych z tlenowym rozkładem substancji organicznej. W biomasach bogatych w węglowodany (kukurydzy zbieranej w II fazie oraz miskantów) najskuteczniej chronił przed rozkładem tlenowym dodatek kwasu mrówkowego. Dodatki bakteryjne i enzymatyczne okazały się mało efektywne jako czynniki chroniące przed rozkładem tlenowym.

### 3.3. Wydajność biogazowa przechowywanej biomasy

Celem badań było określenie i porównanie potencjału produkcji biogazu i metanu z biomasy w zależności od rodzaju surowca i stosowanych dodatków konserwujących. Wartość biogazową biomasy różnych surowców roślinnych

przechowywanych bez dodatków w skali laboratoryjnej przedstawiono w tabeli 3.5. Wykazano, że najwyższą koncentracją metanu w biogazie, a także najwyższą jego wydajnością w przeliczeniu na 1 kg suchej masy organicznej charakteryzowała się biomasa miskanta cukrowego. Wartość biogazowa tej biomasy ( $364 \text{ I}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ ) w porównaniu z wydajnością uzyskaną z miskanta olbrzymiego była wyższa o ok. 13%, sorga cukrowego – o 19%, jak również przewyższała wartości stwierdzone dla kiszzonek z kukurydzy I i II fazy zbioru (odpowiednio o 12 i 44%) oraz koniczyny czerwonej i lucerny (odpowiednio o 44 i 39%).

Tabela 3.5

Wydajność biogazu i metanu z testowanych surowców roślinnych konserwowanych bez dodatków

Rodzaj biomasy	Wydajność biogazu $\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$	Zawartość $\text{CH}_4$ w % v/v biogazu	Wydajność biometanu $\text{I}_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$
Koniczyna czerwona	457	55,1	252
Lucerna siewna	468	56,0	262
Kukurydza I faza	572	56,8	325
Kukurydza II faza	485	52,2	253
Sorgo cukrowe	498	61,5	306
Miskant cukrowy	515	70,7	364
Miskant olbrzymi	486	66,4	323

Wydajność metanu z konserwowanej biomasy kukurydzy (I fazy), miskanta olbrzymiego oraz sorga cukrowego była zbliżona i wynosiła od 325 do 306  $\text{I}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  Biomasy te różniły się jednak zawartością metanu w produkowanym biogazie. Wyższym jego udziałem charakteryzowała się biomasa miskanta olbrzymiego. W odniesieniu do biomasy kukurydzy zbieranej w dojrzałości woskowej (II faza) ilość biogazu oraz zawartego w nim metanu była niższa w porównaniu z wydajnością kukurydzy I fazy. Udział metanu w biogazie stanowił 52,2%, a jego wydajność z 1  $\text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  wynosiła 253  $\text{I}_N$ . Podobnymi parametrami biogazowości charakteryzowała się biomasa roślin motylkowatych (koniczyny czerwonej i lucerny siewnej).

Wpływ poszczególnych dodatków konserwujących na wydajność biogazu i metanu był zróżnicowany w zależności od rodzaju testowanych surowców roślinnych (tabela 3.6).

W odniesieniu do biomasy koniczyny czerwonej najbardziej efektywne w podnoszeniu wartości biogazowej okazały się preparaty enzymatyczne, szczególnie ( $\text{D}_1$ ) zawierający w swoim składzie beta-glukanazę, endoksylnalazę oraz glukozamylazę, a najmniej inokulant (B). W porównaniu z biomasa kontrolną wydajność metanu biomasy z powyższym preparatem enzymatycznym była wyższa o ponad 9% (275 vs. 252  $\text{I}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ ).

Tabela 3.6

Wydajność biogazu i metanu z testowanych surowców roślinnych konserwowanych z dodatkami

Rodzaj biomasy	Dodatek	Wydajność biogazu $I_N \cdot \text{kg}^{-1}\text{s.m.o}$	Zawartość $\text{CH}_4$ w % v/v biogazu	Wydajność metanu $I_N \cdot \text{kg}^{-1}\text{s.m.o}$
Koniczyna czerwona	A	470	56,0	263
	B	472	55,1	260
	C	460	58,9	271
	D <sub>1</sub>	483	57,0	275
	D <sub>2</sub>	473	57,9	274
Lucerna siewna	A	484	57,0	276
	B	485	56,9	276
	C	490	58,0	284
	D <sub>1</sub>	473	55,0	260
	D <sub>2</sub>	491	56,0	275
Kukurydza I faza	A	596	64,3	383
	B	589	57,2	337
	C	645	74,9	483
	D <sub>1</sub>	605	66,6	403
	D <sub>2</sub>	630	74,8	453
Kukurydza II faza	A	537	56,7	304
	B	564	64,1	362
	C	512	54,1	277
	D <sub>1</sub>	523	56,7	297
	D <sub>2</sub>	528	52,5	277
Sorgo cukrowe	A	510	69,9	356
	B	421	48,0	202
	C	505	64,3	325
	D <sub>1</sub>	505	68,2	344
	D <sub>2</sub>	560	76,3	427
Miskant cukrowy	A	534	76,2	407
	B	529	73,6	389
	C	522	71,3	372
	D <sub>1</sub>	496	68,3	339
	D <sub>2</sub>	532	76,9	409
Miskant olbrzymi	A	475	66,1	314
	B	489	76,6	375
	C	500	73,0	365
	D <sub>1</sub>	420	58,6	246
	D <sub>2</sub>	515	78,3	403



W przypadku biomasy lucerny preparat bakteryjno-enzymatyczny (C) w największym stopniu zwiększał nie tylko ilość produkowanego biogazu, lecz także koncentrację w nim metanu, co wpłynęło na najwyższą wydajność metanu w porównaniu z biomasą kontrolną lub przechowywaną z innymi dodatkami konserwującymi.

Interesujące dane uzyskano dla biomasy z kukurydzy konserwowanej z dodatkami. Kukurydza zbierana w dojrzałości mleczno-woskowej i konserwowana z dodatkiem bakteryjno-enzymatycznym (C) charakteryzowała się najwyższymi analizowanymi parametrami. W porównaniu z biomasą kontrolną biogaz zawierał wysoką koncentrację metanu (74,9 vs. 56,8%), a jego wydajność z 1 kg s.m.o. była wyższa aż o 48,6%. W odniesieniu natomiast do biomasy kukurydzy zbieranej w II fazie inokulant (B) był najbardziej skuteczny w podwyższeniu wydajności biogazowej. Uzysk metanu z tej biomasy był wyższy o 43% w porównaniu z biomasą kontrolną.

Porównanie wartości biogazowej biomasy z sorga cukrowego konserwowanej z różnymi dodatkami wykazało, że najwyższym potencjałem do produkcji biogazu i zawartego w nim metanu charakteryzowała się biomasa z dodatkiem (D<sub>2</sub>) zawierającym enzymy hemicelulazę i celulazę. Wydajność metanu wynosiła 427 I<sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup> s.m.o. i była o 39% wyższa w porównaniu z biomasą kontrolną. Natomiast inokulant (B) okazał się najmniej efektywnym dodatkiem. Uzyskane wartości dla tej biomasy były niższe od parametrów biomasy przechowywanej bez dodatków.

Pozytywny wpływ preparatu enzymatycznego (D<sub>2</sub>) stwierdzono również dla biomasy miskanta cukrowego i miskanta olbrzymiego. W porównaniu do wydajności metanu biomasy bez dodatków jego ilość z 1 kg s.m.o. w przypadku miskanta cukrowego wzrosła o 12,4%, a w odniesieniu do miskanta olbrzymiego o 24,8%. Z kolei inny skład enzymatyczny preparatu D<sub>1</sub> okazał się pod względem podniesienia wydajności biogazowej wyjątkowo nieskuteczny. Ilość biogazu i zawartego w nim metanu zarówno z biomasy miskanta cukrowego, jak i olbrzymiego była najniższa. Należy jednocześnie podkreślić, że wysoką wartością biogazową charakteryzowała się biomasa miskanta cukrowego z dodatkiem kwasu mrówkowego (A) i były to parametry bardzo zbliżone do wartości z dodatkiem enzymatycznym D<sub>2</sub>.

Wydajność biogazu i metanu biomasy przechowywanej w skali półtechnicznej przedstawiono w tabeli 3.7. Parametry biogazowości biomasy przechowywanej bez dodatków konserwujących były nieznacznie niższe w porównaniu z wydajnością uzyskaną w warunkach laboratoryjnych. Wyjątek stanowiła biomasa kukurydzy, potwierdzając tym samym wysoki potencjał biogazowości. Wydajność metanu biomasy kukurydzy przechowywanej bez dodatków wynosiła 301 I<sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup> s.m.o. i w porównaniu z wydajnością biomasy miskanta cukrowego, miskanta olbrzymiego i sorga cukrowego była wyższa odpowiednio

o 7,50; 19,4 i 24,8%. W odniesieniu natomiast do biomasy koniczyny czerwonej i lucerny wartości były jeszcze wyższe i wynosiły odpowiednio 40 i 50%. Zastosowanie inokulantu (B) do konserwowania biomasy kukurydzy zwiększyło potencjał biogazowy o 12,6% w porównaniu biomasa kontrolną (339 vs. 301  $I_N$  metanu  $\cdot$  kg<sup>-1</sup> s.m.o.).

Tabela 3.7  
Wydajność biogazu i metanu z surowców roślinnych konserwowanych w skali półtechnicznej

Rodzaj biomasy	Dodatek	s.m. (%)	s.m.o. (%)	Wydajność biogazu $I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{s.m.o.}$	Zawartość CH <sub>4</sub> w % v/v biogazu	Wydajność metanu $I_N \cdot \text{kg}^{-1} \text{s.m.o.}$
Koniczyna czerwona	O	28,7	89,9	398	54,0	215
	D <sub>1</sub>	29,2	90,2	421	55,8	235
Lucerna siewna	O	40,1	88,2	353	57,0	201
	C	40,4	89,4	423	53,5	226
Kukurydza	O	29,6	95,7	516	58,4	301
	B	30,2	95,3	600	56,5	339
Sorgo cukrowe	O	16,7	92,6	413	58,4	241
	D <sub>2</sub>	18,8	92,8	533	62,2	332
Miskant cukrowy	O	36,1	94,9	481	58,2	280
	D <sub>2</sub>	38,5	95,4	495	60,2	298
Miskant olbrzymi	O	29,9	94,6	412	61,2	252
	D <sub>2</sub>	29,9	93,9	471	60,5	285

Zbliżoną do biomasy kukurydzy wydajnością metanu (332  $I_N \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.o.) charakteryzowała się biomasa sorga cukrowego przechowywana z dodatkiem (D<sub>2</sub>) zawierającym enzymy hemicelulazę i celulazę. W porównaniu z biomasa kontrolną wydajność metanu z tej biomasy była wyższa o 38%, co koresponduje z wynikami uzyskanymi w skali laboratoryjnej.

W odniesieniu do miskanta cukrowego i miskanta olbrzymiego pozytywny wpływ dodatku D<sub>2</sub> na wydajność metanu również został potwierdzony, przy czym skuteczność tego dodatku w podwyższaniu biogazowości biomasy w porównaniu ze skalą laboratoryjną okazała się niższa. Natomiast zastosowany w skali półtechnicznej dodatek enzymatyczny D<sub>1</sub> przy konserwowaniu koniczyny oraz preparat bakteryjno-enzymatyczny (C) do lucerny charakteryzował się podobną jak w warunkach laboratoryjnych efektywnością w podnoszeniu wydajności metanu. W porównaniu z biomasa kontrolną wydajność metanu z biomasy koniczyny była wyższa o 9,3%, a biomasy z lucerny o 12,4%.

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że w warunkach laboratoryjnych spośród biomas przechowywanych bez dodatków, najwyższym potencjałem wydajności metanu w przeliczeniu na 1 kg suchej masy organicznej charakteryzowała się biomasa miskanta cukrowego, a w skali półtechnicznej biomasa

kukurydzy. Dodatki zawierające enzymy (C; D<sub>1</sub>; D<sub>2</sub>) wykazywały największy pozytywny wpływ na wydajność biogazu (6 z 7 rodzajów biomasy), przy czym ich skuteczność była w warunkach laboratoryjnych nieznacznie wyższa w porównaniu ze skalą półtechniczną.

### 3.4. Koszty przygotowania do przechowywania i koszty przechowywania biomasy z różnych surowców roślinnych

Tabela 3.8  
Zestawienie kosztów konserwowania i przechowywania biomasy z poszczególnych roślin energetycznych (zł/t biomasy)

Rodzaj biomasy	Składowanie	Koszty przygotowywania	Koszt dodatków	Koszt przechowywania	Ogółem
Koniczyna czerwona	balot/pryzma	45,44/23,2	–	14,68/13,1	60,12/38,7
		45,44/23,2	4,5	10,78/6,10	60,72/33,9
Lucerna siewna	balot/pryzma	45,44/23,2	–	11,47/11,7	56,91/35,0
		45,44/23,2	4,8	8,58/5,7	58,82/33,8
Kukurydza	pryzma	25,54	–	4,54	30,08
		25,54	3,0	2,97	31,51
Sorgo cukrowe	pryzma	23,96	–	8,20	32,16
		23,96	5,2	6,33	35,49
Miskant cukrowy	pryzma	29,62	–	7,30	36,92
		29,62	5,2	5,04	39,86
Miskant olbrzymi	pryzma	30,17	–	6,94	37,11
		30,17	5,2	4,31	39,68

Najniższe sumaryczne koszty konserwowania i przechowywania w pryzmach stwierdzono w odniesieniu do biomasy kukurydzy i sorga, natomiast najwyższe w odniesieniu do biomasy koniczyny i lucerny (tabela 3.8). Koszty konserwowania i przechowywania biomasy lucerny i koniczyny w technologii bel cylindrycznych okazały się odpowiednio o 62 i 55% wyższe w porównaniu z technologią przechowywania w pryzmach (odpowiednio 56,9 vs. 35,2 i 60,1 vs. 38,7 zł). Koszty wynikające ze strat energii w czasie przechowywania kukurydzy były najniższe i stanowiły 15,0% wszystkich kosztów, natomiast najwyższe w przypadku koniczyny czerwonej 35,9%. W pozostałych rodzajach biomasy wzrost kosztów powodowanych stratami wynosił w przypadku miskanta olbrzymiego, miskanta cukrowego, sorga, lucerny odpowiednio 18,9; 19,7; 25,5; 33,4%.

Przeprowadzone badania pozwoliły na uszeregowanie poszczególnych rodzajów biomasy z upraw jednorocznych pod względem ich przydatności do ciągłej produkcji biogazu (tabela 3.9). Najmniejszą ilość punktów uzyskała kukurydza, która potwierdziła największą przydatność do ciągłej produkcji biogazu.

Tabela 3.9  
Przydatność biomasy z upraw jednorocznych do ciągłego wykorzystania w produkcji biogazu

Rodzaj biomasy	Straty	Dodatki	Wydajność biogazu	Stabilność tlenowa	Koszty	Suma	Ranking
Koniczyna czerwona	5	6	5	4	4	24	VI
Lucerna siewna	6	5	6	2	3	22	V
Kukurydza	1	3	1	3	1	9	I
Sorgo cukrowe	4	2	4	1	2	13	II
Miskant cukrowy	2	4	2	5	5	18	III
Miskant olbrzymi	3	1	3	6	6	19	IV

## 4. Dyskusja

Analiza składu chemicznego biomasy wykazała największe zróżnicowanie w odniesieniu do frakcji cukrowców strukturalnych (NDF i ADF) oraz wskaźnika lignifikacji (ADL). Zawartość i skład tych frakcji są silnie związane z gatunkiem roślin oraz z terminem zbioru [7]. W czasie wegetacji najmniejsza dynamika zmian występuje w kukurydzy i sorgo cukrowym, natomiast największa w lucernie i koniczynie czerwonej. W prezentowanych badaniach zawartość NDF w koniczynie czerwonej była o 3% niższa, natomiast ADF o 3% wyższa od wartości odnotowanych przez Purwina i in. [21]. Zawartość frakcji NDF i ADF w biomase kukurydzy była zbliżona do wartości uzyskanych przez innych autorów [18, 19]. W badaniach Browne i in. [7] w biomase kukurydzy zbieranej 3 i 24 września stwierdzono różnicę w zawartości NDF, ADF i ADL odpowiednio 4,8; 3,4 i 0,5%, a w badaniach własnych różnice w zawartości tych frakcji między kukurydzą I fazy i kukurydzą II fazy dojrzałości były jeszcze mniejsze. Zawartość NDF i ADF w biomase sorga cukrowego była niższa odpowiednio o 7 i 14% w porównaniu z uzyskanymi przez Gul i in. [11]. W naszych badaniach najwyższy udział NDF odnotowano w biomase miskanta cukrowego (75,5% s.m.) i olbrzymiego (71,4% s.m.). Brosse i in. [6] stwierdzili w biomase miskanta cukrowego i olbrzymiego zbieranego po zakończeniu wegetacji zawartość 86 i 88% NDF, 62 i 61% ADF, natomiast poziom ligniny w biomase obu gatunków miskanta wynosił 12%.

Niskie straty energii w 60-dniowym okresie przechowywania biomasy kukurydzy w II fazie dojrzałości, miskanta cukrowego oraz sorga były prawdopodobnie efektem małej pojemności buforowej surowców, zaś w warunkach naturalnej fermentacji – dominacji bakterii fermentacji mlekowej, a wśród nich bakterii homofermentacyjnych [9]. Uzyskane wyniki są zgodne z danymi Plöchl i in. [19], w których stwierdzono dwukrotnie niższe straty suchej masy podczas przechowywania biomasy kukurydzy w porównaniu z lucerną. Niskie straty odnotowane w czasie przechowywania koniczyny czerwonej, czyli rośliny o dużej pojemności buforowej, uznawanej za trudno kiszzącą się, można tłumaczyć dużym stopniem podsuszenia tego surowca (39,3%), natomiast straty w czasie przechowywania biomasy lucerny potwierdziły, że jest to roślina najtrudniej przechowująca się, tym bardziej że osiągnięty stopień podsuszenia surowca okazał się zbyt niski (27,8%).

Przeprowadzona analiza strat energii (na skalę laboratoryjną) po 180 dniach przechowywania potwierdziła największy potencjał do przechowywania kukurydzy (II faza dojrzałości) i miskanta cukrowego. Wrażliwa na dłuższe przechowywanie w warunkach naturalnej fermentacji okazała się biomasa koniczyny czerwonej, kukurydzy (I faza dojrzałości), sorga. Skuteczność zastosowanych dodatków w ograniczaniu strat energii wahała się od 9 do 64% i była najwyższa w odniesieniu do koniczyny czerwonej, lucerny, kukurydzy (I faza). Potwierdziły się najwyższe możliwości w ograniczaniu strat energii inhibitora fermentacji.

Analizowane wyniki pokazują, że wymiar strat tlenowych po otwarciu zbiornika może przekroczyć wielkość strat energii związanych z fermentacją i przechowywaniem biomasy, zwłaszcza w odniesieniu do roślin charakteryzujących się dużą zawartością łatwo rozkładalnych węglowodanów. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że należy dążyć do skrócenia czasu od momentu wybierania z przemy lub silosu do wprowadzenia jej do reaktora, przy jednoczesnym zastosowaniu dodatku z grupy najskuteczniejszej dla danego gatunku roślin.

Wysoki potencjał biogazowości biomasy kukurydzy wykazany w naszych badaniach potwierdzają wyniki innych autorów [3, 16, 19]. Generalnie wydajność biogazu z biomasy kukurydzy kształtuje się na poziomie od 400 do 700  $I_N \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.o., a koncentracja metanu w biogazie stanowi 50–60%. W naszych badaniach, zgodnie z danymi innych autorów [1], niższa ilość uzyskiwanego metanu ( $I_N \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.o) z biomasy kukurydzy zbieranej w późniejszym okresie (dojrzałość woskowa) w porównaniu z dojrzałością mleczno-woskową (I faza) wynika ze wzrostu zawartości skrobi oraz związków lignocelulozowych w roślinie. Wzrost zawartości węglowodanów powoduje rozluźnienie proporcji między C:N (węgla do azotu). Jeżeli stosunek C:N jest zbyt wysoki (>25: 1), azot będzie szybko zużywany przez bakterie metanowe, co powoduje zmniejszenie

produkcji metanu [20]. Z tego względu przy zbiorze kukurydzy do produkcji metanu zalecane są odmiany późne o liczbie FAO 300–370, a nawet 400, cechujące się wysokim plonem biomasy wegetatywnej, przy jednocześnie niższej zawartości części lignocelulozowych. Klimiuk i in. [16] badali wydajność procesu biogazowania kiszonek czterech gatunków roślin na uprawianych na cele energetyczne: kukurydzy zwyczajnej, sorga cukrowego, miskanta cukrowego i miskanta olbrzymiego. Najniższymi parametrami biogazowości charakteryzowała się biomasa miskantów: zawartość metanu w biogazie stanowiła 55,3 i 48,2%, a jego wydajność wynosiła 0,19 i 0,10  $I_N \cdot g^{-1}$  s.m.o. (odpowiednio dla miskanta cukrowego i olbrzymiego). Podobną tendencję wykazano w naszych badaniach w odniesieniu do biomasy przechowywanej w skali półtechnicznej. Jednak wydajność metanu oraz jego zawartość w biogazie w naszych badaniach była wyższa i wynosiła dla miskanta cukrowego i olbrzymiego odpowiednio 280 i 252  $I_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$  s.m.o., a koncentracja metanu 58,2 i 61,2%. Niższy potencjał biogazowy miskantów w porównaniu z kukurydzą wynika z wyższej zawartości ligniny w tych surowcach. Duża dynamika lignifikacji miskantów [6] wskazuje na celowość wcześniejszego zbioru zielonej biomasy miskantów do produkcji biogazu. Lignina jako substancja inkrustująca węglowodany strukturalne decyduje o stopniu ich degradacji enzymatycznej w czasie kondycjonowania i podaży prostych cukrów do fermentacji metanowej [10]

Wyniki badań dotyczące wpływu dodatków konserwujących na wydajność biogazu i metanu są niejednoznaczne [18, 19]. W badaniach Plöchl i in. [19] wydajność metanu z kiszonki z kukurydzy i kiszonki z lucerny przechowywanych z dodatkami biologicznymi (odpowiednio 319,7 oraz 201,5  $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$  s.m.o.) była niższa w porównaniu do kiszonek kontrolnych (bez dodatków). Inni autorzy [17, 18] podają, że dodatek heterofermentatywnych szczepów bakterii kwasu mlekowego powoduje zwiększenie ilości lotnych kwasów tłuszczowych w kiszonce, co wzmaga produkcję biogazu. W przeprowadzonych badaniach zastosowany do biomasy kukurydzy inokulant zwiększył jej potencjał biogazowy i w porównaniu z biomasa kontrolną wydajność biogazu była wyższa o 16,2%. W odniesieniu do biomasy lucerny preparat bakteryjno-enzymatyczny był najbardziej efektywny poprzez zwiększenie podaży cukrów rozpuszczalnych w wyniku hydrolizy węglowodanów strukturalnych [17]. Podobne działanie wykazywały enzymy hemicelulaza i celulaza (preparat D<sub>2</sub>), które najskuteczniej podnosiły parametry biogazowości sorga cukrowego i obu miskantów. W przypadku tych surowców roślinnych wyniki naszych badań są istotne, ponieważ niewiele jest danych dotyczących możliwości przechowywania tej biomasy z różnymi dodatkami oraz oceny jej wydajności biogazowej.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pozwoliły na uszeregowanie poszczególnych rodzajów biomasy z upraw jednorocznych pod względem ich przydatności do ciągłej produkcji biogazu. Biomasa kukurydzy charakteryzowała się najmniejszymi stratami i kosztami podczas przechowania oraz najwyższą wydajnością biogazową. Rodzajem biomasy o dużej przydatności okazało się sorgo cukrowe dzięki niskim kosztom przechowywania, dużej podatności na działanie dodatków oraz najlepszej stabilności tlenowej. Najmniej przydatnymi surowcami do ciągłej produkcji biogazu okazała się biomasa z roślin motylkowatych (lucerny siewnej i koniczyny czerwonej).

Analizując skuteczność stosowanych dodatków konserwujących, można stwierdzić, że kwas mrówkowy okazał się najskuteczniejszy w ograniczeniu strat energii, jednakże wydajność biogazowa konserwowanej biomasy była wyższa przy zastosowaniu dodatku enzymatycznego zawierającego hemicelulazę i celulazę (sorgo cukrowe, miskant cukrowy, miskant olbrzymi), dodatek bakteryjny (kukurydza), dodatek bakteryjno-enzymatyczny (lucerna siewna) oraz dodatek enzymatyczny zawierający endoksylianazę, glukoamylazę, beta-glukanazę (koniczyna czerwona).

Na podstawie zastosowanych kryteriów kosztowych można stwierdzić, że wytypowane dodatki ograniczyły straty w czasie przechowywania wszystkich rodzajów biomasy, natomiast efekt ich stosowania mierzony ograniczeniem strat w zł przekroczył ich koszt jedynie w przypadku koniczyny i lucerny konserwowanych w pryzmach.

## 6. Literatura

1. Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Zollitsch W., Mayer K., Gruber L. *Biogas production from maize and dairy cattle manure – Influence of biomass composition on the methane yield*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2007 (118): 173–182.
2. Antonopoulou G., Ntaikou I., Gavala H.N., Skiadas I.V., Angelopoulos K., Lyberatos G. *Biohydrogen production from sweet sorghum biomass using mixed acidogenic cultures and pure cultures of Ruminococcus albus*. Global NEST Journal, 2007, 9 (2): 144–151.
3. Asam Z., Poulsen T.G., Nizami A.S., Rafique R., Kiely G., Murphy J.D. *How we can improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants?* Applied Energy, 2011 (88): 2013–2018.
4. Ashbell G., Weinberg Z.G., Hen Y., Filya I. *The effects of temperature on the aerobic stability of wheat and corn silages*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2002 (28): 261–263.
5. Association of Official Analytical Chemists. *Official Methods of Analysis*. 18<sup>th</sup> ed. Arlington VA, USA, 2005.
6. Brosse N., Dufour A., Meng X., Sun Q., Ragauskas A. *Miscanthus: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production*, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2012, 6 (5): 580–598.

7. Browne E.M., Juniper D.T., Bryant M.J., Beever D.E. *Apparent digestibility and nitrogen utilization of diets based on maize silage harvested at three stages of maturity and fed to steers*. Grass and Forage Science, 2005 (60): 274–282.
8. Davies D.R., Theodorou M.K., Kingston-Smith A.H., Merry R.J. *Advances in silage quality in the 21<sup>st</sup> century*. In: *Proceeding of the XIV<sup>th</sup> International Silage Conference*. Belfast, Northern Ireland 2005: 121–133.
9. Filya I. *The effect of Lactobacillus buchneri with or without homofermentative lactic acid bacteria, on the fermentation, aerobic stability, and ruminal degradability of wheat, sorghum, and maize silage*. Journal of Applied Microbiology, 2003 (95): 1080–1086.
10. Fischer G., Prieler S., Van Velthuizen H. *Biomass potential of miscanthus, willow and poplar: results and policy implications for Eastern Europe, Northern and Central Asia*. Biomass and Bioenergy, 2005 (28): 119–132.
11. Gul I., Demirel R., Kilicalp N., Sumerli M., Kilic H. *Effect of crop maturity stages on yield, silage chemical composition and in vivo digestibilities of the maize, sorghum and sorghum-sudangrass hybrids grown in semi-arid conditions*. Journal of Animal and Veterinary Advances, 2008 (7): 1021–1028.
12. Hallam A., Anderson I.C., Buxton D.R. *Comparative economic analysis of perennial, annual, and intercrops for biomass production*. Biomass and Bioenergy, 2001 (21): 407–424.
13. Honig H. *Determination of aerobic deterioration – System Volkenrode*. Institut für Grassland und Futter Pflanzenforschung 1985.
14. Jensen C., Wejsbjerg M.R., Norgaard P., Hvelplund T. *Effect of maize silage maturity on site of starch and NDF digestion in lactating dairy cows*. Animal Feed Science and Technology, 2002 (118): 279–294.
15. Jorgensen J.R., Deleuran L.C., Wollenweber B. *Prospects of whole grain crops of wheat, rye and triticale under different fertilizer regimes for energy production*. Biomass and Bioenergy, 2007 (31): 308–317.
16. Klimiuk E., Pokój T., Budzyński W., Dubis B. *Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents*. Bioresource Technology, 2010 (101): 9527–9535.
17. Mikołajczak J., Wróbel B., Jurkowski A. *Możliwości i bariery w produkcji biogazu z biomasy trwałych użytków zielonych w Polsce*. Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie, 2009 (2): 139–155.
18. Neureiter M., dos Santos J.T.P., Lopez C.P., Pichler H., Kirchmayr R., Braun R. *Effect of silage preparation on methane yields from whole crop maize silages*. In: *4<sup>th</sup> International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste*, Copenhagen 2005 (1): 109–115.
19. Plöchl M., Zacharias H., Herrmann C., Heiermann M., Prochnow A. *Influence of silage additives on methane yield and economic performance of selected feedstock*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript 1123. Vol. XI. June 2009.
20. Podkówka Z., Podkówka W. *Substraty dla biogazowni rolniczych*. Agro-Serwis. Warszawa 2010.
21. Purwin C., Pysera B., Żuk-Golaszewska K., Antoszkiewicz Z., Golaszewski J., Fijałkowska M., Lipiński K. *Fermentation and proteolysis during the ensilage of wilted and unwilted diploid and tetraploid red clover*. Journal Central European Agriculture, 2011, 12 (1): 179–194.
22. Thomas A.T. *An automated procedure for the determination of soluble carbohydrates in herbage*. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1977 (28): 639–642.
23. Van Dam J., Faaij A.P.C., Lewandowski I., Fischer G. *Biomass production potentials in Central and Eastern Europe under different scenarios*. Biomass and Bioenergy, 2007 (31): 345–366.
24. Van Soest P.J., Robertson J.B., Lewis B.A. *Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition*. Journal of Dairy Science, 1991 (74): 3583–3591.