



Wchodzi w skład monograficznej serii wydawniczej, wydanej w ramach programu Strategicznego Zadania Badawczego Nr 4 pt.: „Opracowanie nowych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych” koordynowanego przez Instytut Maszyn Przepływowych Szewalskiego PAN w Gdańsku i realizowanego w ramach umowy nr SP/E/4/65786/10 zawartej z NCBiR

Redaktorzy Serii:

Jan Kiciński, Adam Cenian, Piotr Lampart

Jan Kiciński, Adam Cenian, Piotr Lampart,
Anna Białous, Andrzej Białowiec, Dariusz Butrymowicz,
Sebastian Bykuć, Roman Borecki, Dariusz Czyłkowski,
Marcin Dębowski, Mirosław Dors, Witold Elsner, Maria Gazda,
Tomasz Golec, Janusz Golaszewski, Katarzyna Grochowska,
Bartosz Hryciak, Janina Ilmurzyńska, Tomasz Iluk,
Bogdan Jakubowski, Mariusz Jasiński, Anatol Jaworek,
Janusz Jewulski, Wiesław Jodkowski, Dariusz Kardaś,
Jarosław Karwacki, Jacek Kluska, Przemysław Kowalski,
Zbigniew Korczewski, Andrzej Krupa, Mirosław Krzemieniewski,
Jakub Kupecki, Roman Kwidziński, Marcin Lackowski,
Michał K. Łuczyński, Ryszard Michalski, Robert Miotk,
Jerzy Mizeraczyk, Ewelina Olba-Zięty, Janusz Piechocki,
Leszek Piechowski, Tomasz Przybyliński, Grzegorz Przybyła,
Krzysztof Remiszewski, Joanna Reszczyńska, Jacek Rudnicki,
Mirosław Sawczak, Andrzej Sitka, Mariusz Siudak,
Katarzyna Siuzdak, Gerard Śliwiński, Arkadiusz T. Sobczyk,
Aleksander Sobolewski, Sławomir Stelmach, Mariusz Stolarski,
Mariusz Szymaniak, Kamil Śmierciw, Marian Trela,
Dariusz Wiśniewski, Irena Wojnowska-Baryła, Kazimierz Wójs,
Marian Wysocki, Adriana Zaleska, Marcin Zieliński

Technologie i urządzenia zrównoważonej energetyki rozproszonej bazujące na substratach z biomasy i odpadów rolniczych



GDAŃSK 2015

Jan Kiciński, Adam Cenian, Piotr Lampart i inni

Technologie i urządzenia zrównoważonej energetyki rozproszonej
bazujące na substratach z biomasy i odpadów rolniczych

Recenzent:
dr hab. inż. Jerzy Świryzdzuk

Redaktor naukowy:
prof. dr hab. inż. Jan Kiciński

Opracowanie wydawnicze:
Aleksandra Nowaczewska, Rafał Jendrzewski

Projekt okładki:
Mirosław Sawczak

Wydawnictwo Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego
Polskiej Akademii Nauk, Gdańsk, 2015

ISBN 978-83-88237-48-5

Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych PAN
ul. J. Fiszer 14, 80-231 Gdańsk
tel. 58 6995141; fax 58 3416144; e-mail: redakcja@imp.gda.pl

Druk i oprawa: Expol, ul. Brzeska 4, 87-800 Włocławek

SPIS TREŚCI

1. Wstęp - ekoinnowacyjne technologie dla energetyki zrównoważonej rozwijane w Projekcie Strategicznym NCBiR	9
1.1. Zrównoważona energetyka prosumencka	9
1.1.1. Uwarunkowania geofizyczne	11
1.1.2. Energetyka prosumencka jako źródło rozwoju regionu	11
1.1.3. Rola lokalnych władz i środków publicznych jako "first mover" rozwoju	12
1.2. Autonomiczne Regiony Energetyczne	13
1.3. Technologie	14
1.4. Literatura	18
2. Pilotażowe instalacje kogeneracyjne/poligeneracyjne z układem ORC	19
2.1. Wprowadzenie	19
2.2. Modernizacja obiektów ciepłowniczych	19
2.3. Modelowy układ ORC	26
2.4. Układ gazowo/parowy ORC	28
2.5. Literatura	31
3. Strumieniowy układ produkcji chłodu	33
3.1. Wprowadzenie	33
3.2. Poprawa efektywności urządzeń strumieniowych	35
3.3. Regulacja wydajnością strumienicy	39
3.4. Uwagi końcowe	43
3.5. Literatura	44
4. Technologie zgazowania dla rozproszonej energetyki	47
4.1. Wstęp	47
4.2. Reaktor KAJOT	49
4.3. Kogeneracyjna instalacja pilotażowa z układem zgazowania pirolitycznego odpadów komunalnych i ściekowych	54
4.3.1. Analiza porównawcza wyników symulacji pracy instalacji z wynikami pomiarów instalacji rzeczywistej	55
4.4. Układ zagospodarowania energetycznego trudnoutylizowalnych odpadów pochodzenia rolniczego	58
4.4.1. Prototyp reaktora dolnościowego bez przewężenia konstrukcyjnego	59
4.5. Zgazowanie biomasy o różnym rozdrobnieniu i stopniu wilgotności	61

Iluk T. – Badania układu zgazowania biomasy zintegrowanego z silnikiem linowym, Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 2012.

Iluk T., Sobolewski A., Kotowicz J., Iluk T. – Research of Integrated Biomass Gasification System with a Piston Engine, Proceedings of Ecos 2012 – The International Conference On Efficiency, Cost, Optimization, Simulation And Environmental Impact Of Energy Systems, 414 – 1-10, ISBN 978-88-6655-322-9.

Kotowicz J., Sobolewski A., Iluk T. – Parametric analysis of biomass gasification installation integrated with a combustion engine, Proceedings of 24th International Conference ECOS 2011, 4-7 July 2011, Novi Sad, Serbia, s. 3658-3667.

Iluk T., Sobolewski A., Kotowicz J., Bartela Ł. – Biomass drying integrated with gasification plant of 1,5 MW power output, Power engineering and Environment 2011, Ostravice, 29+31 August 2011, 34-39.

Kotowicz J., Sobolewski A., Iluk T. – Doświadczenia eksploatacyjne z ruchu demonstracyjnej instalacji zgazowania biomasy o mocy 1,5 MW_e. Materiały V Konferencji Naukowo – Technicznej Energetyka 2013, Gliwice 2013, 133–142, ISBN 978-83-61506-20-1.

Iluk T. – Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Technology, Oxford, Elsevier, 2010.

Iluk T., Kazimierski P., Kardaś D. – Charakterystyka wysokotemperaturowej pirolizy biomasy w zależności od rozdrobnienia wsadu, Gdańskie Wydawnictwo Maszyn Przemysłowych; 335/2013.

Iluk T., Eidman V., Simpson E. – Convergence of Agriculture and Energy: Implications for Research and Policy, College of Agricultural Science and Technology, November 2006.

Iluk T., Schlegel R. – Ethanol's Energy Return on Investment: A Survey of Literature, 1990 – Present, Environ. Sci. Technol., 40 (6), 2006, 1744–1750.

Iluk T. – Skrócony kurs gorzelnictwa rolniczego, Warszawa, 1993.

Iluk T. – Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts Are Negative, Natural Resources Research 12 (2), 2003, 129–134.

5. Nowe rozwiązania technologiczne w procesie produkcji biogazu z odpadów rolniczych

Janusz Gołaszewski, Irena Wojnowska-Baryła

Centrum Badań Energii Odnawialnej UWM w Olsztynie

Opracowano technologię współfermentacji odpadów przemysłu rolnospożywczego. Zaprojektowano biogazownię rolniczą w skali mikro do 10 kW oraz w skali mezo do 400 kW skojarzonej z generacją energii elektrycznej i ciepłej w agregatach prądowców przystosowanych do spalania gazów niskokalorycznych.

5.1. Procesy konwersji odpadów przemysłu rolnospożywczego (wywar gorzelniany, serwatka) i biopaliwowego (faza glicerynowa) do biogazu

Do realizacji założeń projektu w zakresie konwersji odpadów przemysłu rolnospożywczego wykorzystano strukturę produkcji towarowego gospodarstwa rolnego (GR Komorowo, woj. kujawsko-pomorskie), w którym prowadzi się produkcję połową biomasy zielonej na cele paszowe, produkcję mleka oraz alkoholu etylowego w gorzelnii. W gospodarstwie powstają odpady z produkcji zwierzęcej: obornik na słomie rzepakowej, z przetwórstwa rolniczego: wywar gorzelniany.

Efektom zrealizowanych zadań badawczych było opracowanie założeń technologicznych i budowa instalacji biogazowni w skali ułamkowo-technicznej. Na podstawie rzeczywistej produkcji odpadów rolniczych w gospodarstwie rolnym Komorowo prowadzącym ze zróżnicowaną działalnością rolniczą, w tym produkcyjną (bydło mleczne) i przetwórstwo rolne (gorzelnia), przygotowano projekt biogazowni o mocy około 400 kW.

Realizacja koncepcji konwersji odpadów przemysłu rolnospożywczego wymagała opracowania metod wstępnej obróbki substratu do fermentacji metanowej. Oceniono wpływ metod fizycznych, chemicznych oraz bioaugmentacji na efektywność I fazy fermentacji. Przeprowadzono optymalizację substratów oraz parametrów technologicznych współfermentacji odpadów przemysłu rolnospożywczego. Określono metodami izotopowymi dostępność węgla pochodzącego z różnych substratów na skład biogazu. Opracowano założenia techniczne i technologiczne beztlenowych złożeń biologicznych z mikrofalowym wspomaganie fermentacji.

współfermentacji wykorzystano substraty roślinne jak kukurydza, lucernik, ślaziowiec pensylwański, odpady jak obornik, gnojowica, faza glicy z produkcji bioestrów, wywar gorzelniany.

W przygotowaniu substratów lignocelulozowych do współfermentacji obejmującej mechaniczne rozdrabnianie substratów lignocelulozowych do wielkości od 1-10 mm, hydrolizę chemiczną zasadową (0,01 M NaOH), jak i kwasową (5% H₃PO₄).

Wzrost stopnia rozdrobnienia biomasy lignocelulozowej powodowało zwiększenie stężenia związków organicznych (TOC) w fazie ciekłej. Hydroliza kwasowa celulozy zwiększa dodatkowo udział frakcji węgla rozpuszczalnego w cieklej.

W celu zwiększenia biodostępności substratu lignocelulozowego, biomase poddawano eksplozji pary (steam explosion). Testy przeprowadzono w reaktorze termicznym. W zależności od warunków ciśnienia i temperatury, szybkości otwarcia reaktora oraz zastosowanych katalizatorów (kwas, zasada), sub- różnym stopniu zmieniła strukturę. W testach ustalono proporcje substratów (1:4-5), temperaturę w zakresie od 180 do 230°C i ciśnienie od 30 barów. W analizowanych warunkach technologicznych uzyskano zwiększenie stopnia rozdrobnienia biomasy lignocelulozowej. Proces jest energochłonny i dodatkowo w wyższych temperaturach następowały straty materii organicznej.

W celu zwiększenia biodostępności substratu lignocelulozowego, biomase poddawano wstępnej biodegradacji przez wyselekcjonowane organizmy degradujące polimery strukturotwórcze roślin – celulozę i hemicelulozę, które stanowią do 70% biomasy pochodzenia roślinnego. Do hydrolizy wykorzystano grzyby strzępkowe z rodzaju *Trichoderma* (*T. viridescens*, *T. longibrachiatum*, *T. atroviride*, *T. koningi*, *T. citrinoviride*, *T. harzianum*, *T. reesei*) i *Mucor* (*M. hiemalis*), syntetyzujące enzymy z grupy celuloz i hemiceluloz. Ze 125 przebadanych szczepów wyselekcjonowano 12 o największej aktywności enzymatycznej w kierunku do celulozy i hemicelulozy. W efekcie stosowania bioaugmentacji i enzymami zewnątrzkomórkowymi znajdującymi się w płynie pożywienia, uzyskano wzrost produkcji biogazu o 15% podczas współfermentacji kukurydzy i obornika bydlęcego. Szczególnie efektywne było zainoczenie komory fermentacyjnej płynów pochodzących z szczepów z rodzaju *Trichoderma*. Wydajność była wyższa od 11% do 23% w stosunku do próby kontrolnej.

Warto zwrócić uwagę na wpływ składu surowcowego wsadu, na wydajność produkcji w fermentacji metanowej. Testowano mieszaniny roślin jednorocznych (sorgo, siewka, wieloletnich miskanta oraz gliceryny i wywaru gorzelnianego) i substratów do fermentacji metanowej. Skład substratowy wsadu wpływał na szybkość fermentacji oraz wartość współczynnika wydajności metanu, a także na jakość odpadów pofermentacyjnych. Na podstawie badań eksperymentalnych określono parametry produkcji biogazu, stopień rozdrobnienia związków organicznych oraz skład odpadów pofermentacyjnych w zależności od udziału substratów we wsadzie surowcowym. Analizę

statystyczną potwierdzono korzystny wpływ wywaru gorzelnianego na produkcję biogazu/metanu.

Ustalono, że w systemach wieloskładnikowych (wywar gorzelniany, obornik bydlęcy, kiszonka kukurydzy/buraka cukrowego) krzywa produkcji gazu wykazywała fazowość związaną z podatnością substratów na fermentację. Zwiększenie udziału inokulum w postaci wód nadosadowych sprzyjało skróceniu fazy I i uzyskaniu równowagi produkcyjnej. W systemach 3 składnikowych przy zwiększonym udziale kukurydzy z 6% do 19% w stosunku do wywaru gorzelnianego i obornika czas etapu I wydłużał się z 5,5 dni przy najniższym udziale kiszonki kukurydzy do 14 dni przy 19% udziale kukurydzy. Wprowadzenie wód nadosadowych jako inokulum nie wpłynęło na zmianę fazowości procesu, nastąpiło skrócenie I fazy produkcji biogazu z 5,5-14 dni do 2-4 dni. Maksymalna produkcja biogazu uzyskana podczas 21 dniowej stabilizacji bez-tlenowej (test GB₂₁) mieszaniny obornika, wywaru gorzelnianego oraz kiszonki kukurydzy bez względu na udział kiszonki kukurydzy w mieszaninie, zarówno w etapie I jak i etapie II pozostawała na zbliżonym poziomie odpowiednio około 130 dm³/kg s.m.o. i 230 dm³/kg s.m.o. Wprowadzenie wód nadosadowych skutkowało wzrostem maksymalnej produkcji biogazu do 284,7-314,2 dm³/kg s.m. oraz 424,3-432,2 dm³/kg s.m.o. w zależności od ilości udziału kiszonki kukurydzy w mieszaninie trójskładnikowej, a co za tym idzie ilości wprowadzonych wód nadosadowych.

Powyższe dane były podstawą założeń technologicznych rozdzielania fermentacji metanowej substratów wolno i szybko fermentujących. Ocenę produkcji biogazu z wywaru gorzelnianego i obornika bydlęcego oraz kiszonki z kukurydzy przeprowadzono w dwóch układach technologicznych:

- w pierwszym: fermentację wywaru gorzelnianego oraz mieszaniny kukurydzy zwyczajnej i obornika bydlęcego prowadzono równolegle w dwóch reaktorach: reaktor 1 był zasilany samym wywarem gorzelnianym a reaktor 2 mieszaniną kiszonki z kukurydzy zwyczajnej i obornika bydlęcego,
- w drugim: proces fermentacji metanowej w jednym reaktorze zasilanym mieszaniną kiszonki z kukurydzy zwyczajnej oraz obornika bydlęcego i wywaru gorzelnianego.

Współfermentację metanową prowadzono przy następujących parametrach technologicznych procesu:

- wywar gorzelniany: OLR – 1,86 g smo/dm³·d (2,46 g ChZT/dm³·d); hydrauliczny czas zatrzymania (HRT) – 30 d;
- mieszanina kukurydzy zwyczajnej i obornika bydlęcego: stosunek kukurydzy zwyczajnej do obornika – 25:75; OLR – 1,99 g smo/dm³·d; hydrauliczny czas zatrzymania (HRT) – 45 d;

mieszanka kukurydzy zwyczajnej, obornika bydłęcego oraz wywaru gorzelnianego: stosunek kukurydzy do obornika do wywaru gorzelnianego – 6:21:73; OLR – 1,65 g smo/dm³.d; hydrauliczny czas zatrzymania (HRT) – 45 d.

Charakterystykę wsadów surowcowych przedstawiono w tabeli 5.1.

5.1. Właściwości chemiczne substratów do współfermentacji metanowej

tr	Jednostka	Wywar gorzelniany	Kukurydza, obornik bydłęcy	Kukurydza, obornik bydłęcy, wywar gorzelniany
ciężka masa	g/kg	71,37	144,28	108,78
lekką masę	g/kg	55,71	89,73	74,18
ciężko	pH	4,98	5,91	5,49
ciężko	mval/dm ³	45	132	89
ciężko	mg/dm ³	3744	8246	4779
ciężko	mg/dm ³	73809	32875	36293
ciężko	mg	70	758	419
ciężko	N-NH ₄ /dm ³			

Wane substraty charakteryzowały się kwaśnym odczynem. Podczas fermentacji kiszonki kukurydzy zwyczajnej i obornika bydłęcego oraz kukurydzy zwyczajnej, obornika bydłęcego, wywaru gorzelnianego, nieścił się w przedziale od 7,35 do 7,62 pH. Stężenie wodorowęglanowe od 80 do 200 mval/dm³. Udział wywaru gorzelnianego we wsadzie spowodował wzrost zasadowości. Stężenie amoniaku niezależnie od składu fermentacyjnego kształtowało się poniżej 1500-2000 mg/dm³, wartości tych proces: Wzrost stężenia azotu amonowego w wodach pofermentacyjnych wynikał z procesów amonifikacji stanowiących ostatni etap rozkładu mitycznych związków organicznych zawierających azot. W przypadku fermentacji wywaru gorzelnianego odnotowano najwyższe 4491 mg/dm³ stężenie kwasów tłuszczowych (LKT). W przypadku współfermentacji było 2,3-krotnie niższe. W wodach pofermentacyjnych odnotowano spadek stężenia i organicznych mierzony wskaźnikiem ChZT. W tabeli 5.2 zestawiono y charakteryzujące produkcję biogazu podczas fermentacji wywaru nego, współfermentacji kiszonki kukurydzy zwyczajnej i obornika o oraz mieszaniny kukurydzy zwyczajnej, obornika bydłęcego, wywaru-anianego.

Tabela 5.2. Produkcja biogazu podczas fermentacji wywaru gorzelnianego oraz współfermentacji kiszonki kukurydzy zwyczajnej i obornika bydłęcego i mieszaniny kukurydzy zwyczajnej, obornika bydłęcego, wywaru gorzelnianego

Parametr	Wywar gorzelniany	Kukurydza, obornik bydłęcy	Kukurydza, obornik bydłęcy, wywar gorzelniany
Jednostkowa szybkość produkcji biogazu (dm ³ /dm ³ .d)	1,17	1,04	1,07
Współczynnik wydajności biogazu (dm ³ /g s.m.o.)	0,63	0,52	0,65
Współczynnik wydajności metanu (dm ³ CH ₄ /g s.m.o.)	0,43	0,34	0,44
Metan (%)	70	65	68

Uzyskane wartości jednostkowej szybkości produkcji biogazu, współczynnika wydajności produkcji biogazu i metanu wykorzystano do przygotowania założeń projektowych biogazowni o mocy do 400 kW przyjmując rzeczywistą podaż substratów w gospodarstwie rolnym Komorowo (wywar gorzelniany po fermentacji alkoholowej melasy i kukurydzy w ilości 67 m³/d; obornik bydłęcy w ilości 19,1 t/d; kisonka kukurydzy, w ilości 5,5 t/d). Przyjęto alternatywne rozwiązanie procesu fermentacji polegające na odmiennym sposobie zasilania dwóch równoległe pracujących komór dostępnymi substratami:

1. Wariant 1 – fermentacja wywaru gorzelnianego (komora 1) oraz mieszaniny kiszonki z kukurydzy i obornika bydłęcego (komora 2),
2. Wariant 2 – wspólna fermentacja mieszaniny kiszonki z kukurydzy, obornika bydłęcego oraz wywaru gorzelnianego w dwóch równoległe pracujących i identycznie obciążonych komorach fermentacji.

Szacunkowe objętości komór i wydajności fermentacji metanowej zestawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3. Objętość i produktywność gazowa wsadów fermentacyjnych

Parametr	Wariant 1		Wariant 2	
	komora 1	komora 2	komora 1	komora 2
	wywar	kiszonka + obornik	wywar + kiszonka + obornik	
Objętość komory (m ³)	2010	1845	2061	2061
Objętość biogazu (m ³ /d)	2352	1919	2206	2206
	4271		4412	
Objętość metanu (m ³ /d)	1646	1247	1500	1500
	2893		3000	
Moc biogazowni (kW)	≈ 420		≈ 440	

Produkcja biogazu i moc biogazowni w obu wariantach tj. w pierwszym i drugim fermentację wywaru gorzelnianego oraz mieszaniny kukurydzy i obornika bydlęcego oraz w drugim zasilanym mieszaniną kiszonki dziej zwyczajnej oraz obornika bydlęcego i wywaru gorzelnianego była równa.

Produkcja biogazu wymaga znacznie krótszego hydraulicznego czasu zainstalacji niż 30 dni. Wydzielając fermentację wywaru gorzelnianego, można zmniejszyć obciążenie ładunkiem związków organicznych komorę do współfermentacji obornika i kiszonki z kukurydzy, przechodząc na fermentację półsuwną rozwiązanie technologicznym jest skrócenie hydraulicznego czasu instalacji co obniży stabilność biologiczną pofermentu.

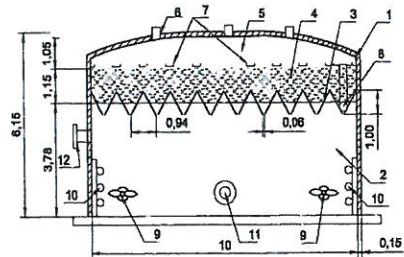
W ramach badań aplikacyjnych prowadzono badania podstawowe i analizy szlaków tworzenia metanu i ditlenku węgla w przemianach zachodzących z wykorzystaniem metod izotopowych. W izotopowym bilansie wykorzystano dane o zawartości węgla organicznego w substratach i produktach, zawartości ditlenku węgla i metanu w biogazie, objętość biogazu, straty i pofermentatów, masy molowe związków węgla (ditlenek węgla), wartości zawartości izotopu $\delta^{13}\text{C}$ substratów i produktów metanowych. W celu analizy szlaków metabolicznych przeprowadzono 34 warianty fermentacji metanowej wsadów jednorodnych (3) i mieszanych (31) przygotowanych na bazie odpadów, kiszonek i biomasy roślin (wywar gorzelniany, melasa, kiszonki z traw, kiszonka kukurydzy, kiszonka z lucerny, śluzowica pensylwańska). Skład izotopowy węgla $\delta^{13}\text{C}$ w substratach do fermentacji metanowej wynosi od -14‰ (kiszonka kukurydzy) do -30‰ (lucerna). Wartość $\delta^{13}\text{C}$ kukurydzy wynikała z faktu, iż kukurydza jest rośliną typu C4, natomiast do pozostałych roślinnych substratów jak lucerna, trawy lub melasa pensylwańska. W tabeli 5.4 przedstawiono skład izotopowy substratów do fermentacji metanowej.

Tabela 5.4. Skład izotopowy substratów wykorzystywanych do fermentacji metanowej

Skład izotopowy substratów wykorzystywanych w eksperymentach	
Substrat	$\delta^{13}\text{C}$ [‰]
Kukurydza	-14,90
Melasa	-30,00
Śluzowica	-27,95
Melasa	-28,65
Melasa	-28,02
Wyrwar gorzelniany	-26,84
Obornik	-21,81
Osad z oczyszczalni ścieków	-29,20
Wywarka Compostreat	-26,65

Z tempa fermentacji wsadów jednorodnych wynika, że w pierwszych dniach zachodzi utlenianie metanu lub metan powstaje głównie w wyniku redukcji CO_2 . Po ustabilizowaniu się warunków technologicznych dominuje fermentacja octowa, co zapewnia maksymalną produkcję metanu, natomiast po około 15 dniach następuje redukcja CO_2 z jednoczesnym zanikiem fermentacji octowej.

Uzyskane wartości izotopu węgla w metanie $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ ze wsadów: melasa + kiszonka traw oraz melasa + śluzowica pensylwańska + kiszonka traw + inokulum wskazują na dominację syntezy metanu w wyniku rozkładu kwasu octowego. W przypadku wsadów: obornik + wyrwar gorzelniany + osad z oczyszczalni ścieków oraz melasa + kiszonka z kukurydzy + kiszonka z lucerny + śluzowica pensylwańska wartości $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ wskazują na występowanie mieszanych ścieżek metanogenezy, z okresową dominacją redukcji ditlenku węgla. Temperatura 30°C sprzyja mikroorganizmom heterotroficznym i głównym substratem do syntezy metanu jest kwas octowy. Prowadzenie fermentacji metanowej wsadów mieszanych w temperaturze 30°C , jest zasadne ze względu na dostępność źródeł węgla, o czym świadczą zmiany składu izotopowego węgla oraz wodoru. Dodatkowo w temperaturze 30°C , dominuje synteza metanu przez bakterie heterotroficzne z wykorzystaniem kwasu octowego. Substraty takie jak obornik, kiszonka kukurydzy charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami $\delta^{13}\text{C}$, co wpływa na zawartość $\delta^{13}\text{C}$ w produkowanym metanie. Skład izotopowy węgla w metanie zależy od stopnia dostępności biologicznej związków organicznych we wsadzie w fermentacji metanowej.



Rys. 5.1. Schemat Reaktora Beztlennego Mikrofalowego R – zasilanego substratem roślinnym. 1 – obudowa wraz z ociepleniem, 2 – część dolna reaktora, 3 – łapacz osadu, 4 – wypełnienie, 5 – część gazowa, 6 – generatory mikrofalowe, 7 – rozpraszacz substratu, 8 – czepnia dla pompy recyrkulacyjnej, 9 – mieszadła zatapialne, 10 – system ogrzewania, 11 – doprowadzenie substratu, 12 – odpływ osadu przefermentowanego

Wydajność fermentacji metanowej zależy nie tylko od parametrów technicznych, ale również od warunków technicznych procesu. Opracowano więc beztlenowe złoża biologiczne z mikrofalowym wspomaganie (rys. 5.1). W reaktorze są dwie części, dolna – osadową oraz górną – biologiczną. Substrat organiczny jest wprowadzany do części osadowej. Dochodzi do kontaktu i wymieszania substratu z biomasą bakterii. Faza ciekła substratu jest recykulowana na złożo biologiczne. Przepływa przez wypełnienie z osiadłymi bakteriami, jest odprowadzana z reaktora przewodem zlokalizowanym w dolnej części reaktora. W części dolnej zachodzą procesy hydroлізу, kwasooctanogenezy. W części górnej dominuje metanogeneza. Dodatkowo na reaktor, z wypełnieniem biologicznym, jest poddawana działaniu mikrofalowemu, co zapewnia ustaloną temperaturę biologiczną i wpływa na efektywność fermentacji metanowej oraz warunki uwalniania gazu.

azowiec *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby jako substrat biogazowni rolniczej oraz ocena warunków środowiskowych

W tym celu opracowano technologię produkcji i konserwacji biomasy ślazuowca, kosubstratu biogazowni, w tym zagospodarowanie nawozowe pofermentu. Przeprowadzono ocenę oddziaływania plantacji ślazuowca na środowisko oraz analizę energetyczną produkcji biogazu ze ślazuowca.

Ślazuowiec pensylwański jest rośliną wieloletnią i dlatego eksperymenty zostały przeprowadzone do 2015 r. W trzecim roku użytkowania plantacji, a drugim zbioru, średnie plonowanie na poziomie 32,2 t/ha. Sprawdzano możliwość zbioru biomasy zielonej w ciągu roku. Wykazano wpływ nawożenia azotowego na zawartość popiołu, włókna, ligniny i celulozy w biogazowcu. W obiektach użytkowanych dwukrotnie w kolejnych latach obserwowano coraz słabszy odrost roślin.

Emisja podtlenku azotu z plantacji ślazuowca była nierównomiernie rozłożona, różnicowana i zależna od systemu zbioru rośliny. Sumaryczna emisja z obiektów, w których zastosowano jednorazowy zbiór roślin była wyższa niż z obiektów dwukrotnych. Średnia emisja podtlenku azotu z obiektów nienawożonych była wyższa niż z gleb nawożonych N90P40K60. Nie stwierdzono emisji CH_4 z gleb z uprawą ślazuowca pensylwańskiego. Emisja metanu występuje głównie na glebach nadwilgotnionych.

Wartość kosztów minimalnych i maksymalnych różnych technologii uprawy wyniosła -2247,20 zł·ha⁻¹. Różnica w plonie świeżej masy wynosiła 1 t·ha⁻¹, co w przeliczeniu na 1 t świeżej biomasy ślazuowca dało różnicę

w kosztach wynoszące około 64 zł. Wyliczona różnica pomiędzy nakładami minimalnymi a maksymalnymi na produkcję biomasy ślazuowca wyniosła 17648,8 MJ·ha⁻¹, co w przeliczeniu na 1 t świeżej masy przy różnym plonie odpowiada nakładom energetycznym w wysokości 502,4 MJ.

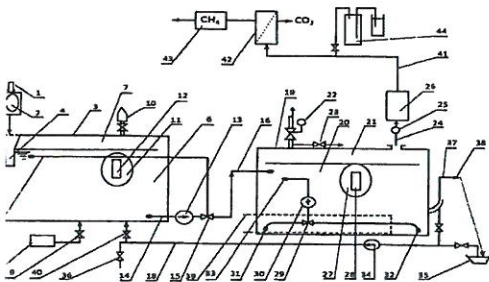
Ze względu na niską zawartość cukrów rozpuszczalnych w wodzie oraz wysoką pojemność buforową, biomasa ślazuowca okazała się surowcem trudnym do konserwowania poprzez zakiszenie. W testowanych kiszonkach ślazuowca bez dodatków uzyskano niezadawalający stopień zakwaszenia, niewłaściwą fermentację, małą odporność na zagrzewanie. Biomasa z 2-krotnego zbioru charakteryzowała się niższym stopniem lignifikacji, wyższą zawartością wody co wpływało na niską efektywność konserwowania i straty energii podczas przechowywania.

Wartość nawozowa pofermentu z fermentacji metanowej ślazuowca istotnie zależała od ilości składników pokarmowych N, P, K, Mg, Ca i Na wprowadzanych do gleby i zawartość w ślazuowcu pensylwańskim. Poferment jest dobrym źródłem składników pokarmowych, ze współczynnikiem wykorzystania azotu przez rośliny 40-80%.

5.3. Założenia systemowe biogazowni i mikrobiogazowni rolniczej; optymalizacja parametrów konstrukcyjnych biogazowni i mikrobiogazowni

Prace projektowo-konstrukcyjne biogazowni poprzedziły testy technologiczne fermentacji metanowej na instalacji ułamkowo-technicznej z różnymi substratami uzyskiwanymi z produkcji polowej, zwierzęcej i przetwórstwa rolnego w GR Komorowo (obornik z dużym udziałem słomy rzepakowej, wywar pogorzelniany oraz substraty uzupełniające: serwatka, gnojowica, kukurydza, proso i buraki). Testy fermentacji metanowej realizowano w dwu-stopniowej instalacji z szeregowym połączeniem hydrolizera i fermentora.

W założeniach projektowych biogazowni o mocy 400 kW przyjęto, że instalacja będzie układem dwustopniowym (rys. 5.2). Hydrolizery pracują naprzemiennie, fermentory równocześnie w sposób ciągły w układzie równoległym. Temperatura fermentacji około 35°C, stężenie suchej masy w reaktorze 9%. Podstawowe założenia instalacji: moc nominalna instalacji do wytwarzania biogazu z surowców rolniczych – 400 kW, roczny czas pracy instalacji: 8000 godz., skład biogazu: 65% CH_4 i 35% CO_2 , wartość opałowa biogazu: 6,5 kWh/m³, ilość wytworzonego biogazu: 62 m³/godz. Zakładany hydrauliczny czas zatrzymania masy fermentacyjnej w fermentorze 45 dni. Objętość cieczy w komorze fermentacyjnej będzie stanowiła 60% objętości całego reaktora. Wolna część (40% objętości) będzie przeznaczona na magazynowanie biogazu. Całkowita objętość fermentora wynosi 815 m³. Projektuje się okresowe mieszanie zawartości reaktora pompami cyrkulacyjnymi z mikserem pompujących



Schemat wykorzystanej instalacji dwustopniowej do produkcji biogazu: 1 - wlot biomasy, 2 - rozdrabniacz, 3 - hydrolizator, 4 - wlot biomasy hydraulicznie, 5 - przykrycie wlotu biomasy, 6 - hydrolizowana biomasa, 7 - poduszka, 8 - zbiornik sprężonego dwutlenku węgla, 9 - dozownik dwutlenku węgla, 10 - wąż do hydrolizatora, 11 - wąż do hydrolizatora, 12 - wąż do hydrolizatora, 13 - pompa podająca, 14 - wąż do hydrolizatora, 15 - zawór trójdrożny, 16 - wąż do hydrolizatora, 17 - wąż do hydrolizatora, 18 - wąż do hydrolizatora, 19 - fermentor, 20 - biomasa, 21 - biogaz, 22 - zawór bezpieczeństwa, 23 - zawór do pobierania gazu, 24 - wąż do hydrolizatora, 25 - odkraplacz, 26 - zbiornik elastyczny biogazu, 27 - wąż do hydrolizatora, 28 - wąż do hydrolizatora, 29 - zawór trójdrożny, 30 - pompa mieszająca, 31 - wąż do hydrolizatora, 32 - wąż do hydrolizatora, 33 - wąż do hydrolizatora, 34 - pompa i wody uzupełniającej, 35 - zbiornik odcieków, 36 - zawór, 37 - urządzenie no-syfonowe, 38 - wylot biomasy-kompostu, 39 - grzejnik wodny rurowy, 40 - wąż do hydrolizatora, 41 - przewód odprowadzający gaz ze zbiornika biogazu, 42 - układ ny metanu i dwutlenku węgla (moduł membranowy lub kaskada tych), 43 - zbiornik na metan, 44 - urządzenie wyporowe do okresowego przepływu biogazu

ę z dna fermentora na powierzchnię cieczy strugą swobodną. By osiągnąć pracę fermentorów przyjęto, że objętość hydrolizera (przy zaopiebnienia biomasa na poziomie 80%) wynosi około 59 m³. Optymalna ura procesu 28-32°C. Zawartość suchej masy w hydrolizerze około zas retencji biomasy w hydrolizerze około 24 godzin. W celu utrzymania temperatury i odczynu zastosowano mieszanie zawartości hydrolizera i cyrkulacyjnymi. Hydrolizer posiada na ścianach bocznych zamontowanienniki ciepła. Po zakończeniu hydrolizy, biomasa jest pompowywasób quasi ciągly (porcjami) układem syfonowym do fermentora. Dożycie składników wsadu: 8880 kg świeżej masy/dobę obornika bydłsłomie rzepakowej 5328 kg świeżej masy/dobę kisonki kukurydzy, bę odcieku z fermentorów, 16 m³/dobę wody procesowej. Ilość od-

wodnionego pofermentu z wirówki dekantacyjnej około 70 kg/godz. Przyjęto grubość ściany żelbetonowej 0,2 m, izolacji styropianowej 0,1 m, średnia temperatura otoczenia w okresie letnim 15°C, średnia temperatura otoczenia w okresie zimowym 10°C, najniższa zakładana temperatura otoczenia -20°C, współczynnik przewodzenia dla żelbetonu 0,13 W/m K, współczynnik przewodzenia dla styropianu 0,05 W/m K, współczynnik przewodzenia dla stali 43 W/m K.

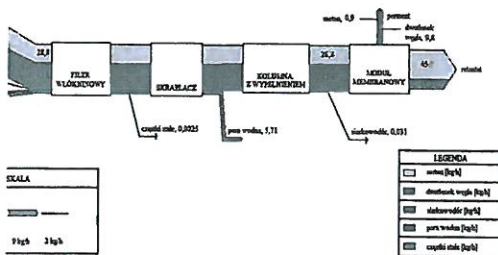
Całkowite straty ciepła uwzględniające straty ciepła dwóch fermentorów i dwóch hydrolizerów oraz rur transportujących i zasilających: straty ciepła w okresie letnim 9,970 kW, straty ciepła w okresie zimowym 23,005 kW, maksymalne straty ciepła 27,954 kW, bilans energii elektrycznej. Energia elektryczna będzie używana przez aparaturę kontrolno-pomiarową, pompy układu hydromieszania (11 pomp na każdy fermentor), pompy tłoczące biomasa z hydrolizera do fermentora oraz z fermentora do wirówki dekantacyjnej, pompy tłocząco-rozdrabniające, wirówkę dekantacyjną, układ sterowania oraz na potrzeby własne, np. oświetlenie. Uwzględniając elektryczną moc zainstalowanych urządzeń oraz czas i harmonogram ich pracy oszacowano, że wymagana moc energii elektrycznej funkcjonowania instalacji będzie wynosić około 20 kW. Opracowano założenia procesowe zateżenia metanu w biogazie pozyskanym z biogazowni o mocy około 400 kW z wykorzystaniem technik membranowych. Powierzchnia membrany (A) potrzebna do uzyskania strumienia objętościowego równego 60 Nm³/h: 37,20 m². Podstawowe założenia technologiczne instalacji to:

- moc biogazowni przy założeniu 100 % wydajności	400 [kW]
- ułamek objętościowy metanu w biogazie	0,55
- ułamek objętościowy dwutlenku węgla w biogazie	0,45
- strumień objętościowy wytworzonego biogazu	62 [Nm ³ /h]
- wydajność produkcji biogazu	0,3 [m ³ /kg s.m.]

Warunki wytwarzania biogazu do instalacji zateżenia są następujące: mieszaninę fermentacyjną stanowią obornik bydłcy na słomie rzepakowej oraz wywar gorzelniany zmieszane w stosunku objętościowym 1:1. Instalacja do wytwarzania biogazu jest dwustopniowa, mezofilna. Temperatura zawiesiny w fermentorze wynosi ok. 35 °C. Hydrauliczny czas zatrzymania w fermentorze wynosi 21 dni. Instalacja pracuje 8000 h w roku. Biogaz zajmuje 40% całkowitej objętości bioreaktora, zaś pozostała część to ciecz fermentacyjna o zawartości suchej masy 9%. W założeniach przyjęto, że biogaz jest gazem doskonałym w warunkach normalnych (T = 273,15 K, p = 1 bar).

Skład zanieczyszczonego biogazu to 55 % obj. CH₄ i 45 % obj. CO₂ w temperaturze 35°C, para wodna - 24,19 m³/kg biogazu, cząstki stałe - 40 mg/m³ biogazu, siarkowodor - 0,15% masowy biogazu. Łączny strumień objętościowy (pary wodnej nasyconej, cząstek stałych, siarkowodoru) (Q) w strumieniu objętościowym biogazu na wlocie do skraplacza wynosi: 1,59 Nm³/h. Bilans masowy metanu w module membranowym jest sumą: m_{CH₄}

+ m₂CH₄. Bilans masowy dwutlenku węgla w module membranowym m₁CO₂ = m₁CO₂ + m₂CO₂. Do bilansu masowego instalacji stacjonarnej, owej do wzbogacania biogazu wykorzystano wykres Sankey'a



Wykres Sankey'a wykorzystany do sporządzenia bilansu masowego instalacji zagęszczania metanu w biogazie

metry separacji membranowej biogazu przy zastosowaniu jednego membranowego typu CO – C07FH firmy UBE INDUSTRIES LTD przed w tabeli 5.5.

5. Charakterystyka zagęszczania metanu w biogazie z wykorzystaniem modułu membranowego typu CO – C07FH firmy UBE INDUSTRIES LTD

	Nadawa	Permeat	Retentat
objętościowy, Nm ³ /h	20,0	10,2	9,8
względne, bar	6,0	0	5,5
ura, °C	20	20	20
CH ₄ , % obj. biogazu	55,00	40,56	70,00
CO ₂ , % obj. biogazu	45,00	59,44	30,00

podstawie właściwości fizykochemiczne i potencjał energetyczny po określono możliwości zastosowania technologii wytwarzania paliwa cji w autorskim projekcie termicznego reaktora komorowego. Paliwa powstające z odwodnionego i osuszonego pofermentu nie odbiegają od yskiwanych podczas termicznego przetwarzania biomasy pochodzenia

drzewnego. Paliwa charakteryzują się podobną kaloryczność około 4,7 MJ/Nm³ i udziałem objętościowym gazów palnych CH₄, CO, H₂.

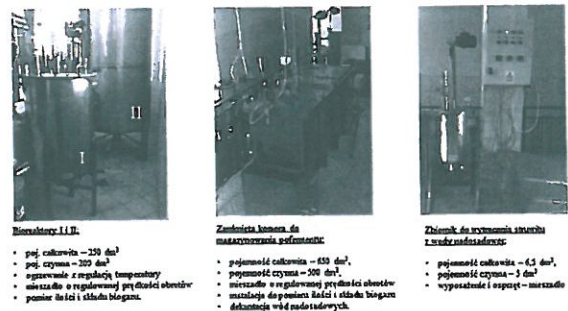
Odwodniony i osuszony poferment charakteryzuje się dużą zawartością popiołów 26,62% w przypadku karbonizatu uzyskanego w procesie pirolizy pofermentu frakcja mineralna stanowiła 49,55%. Wartość opałowa odwodnionego i osuszonego pofermentu wynosi około 13,5 MJ/kg.

W ramach optymalizacji parametrów konstrukcyjnych biogazowni i mikro-biogazowni przy założonej ilości substratu doprowadzanego do komory fermentacyjnej badano optymalne strategie zasilania dotyczące np. cyklu pracy dobowej pomp doprowadzających substrat przy założeniu maksymalnej produkcji metanu. Innym kryterium optymalizacji jest skład mieszaniny doprowadzanej do bioreaktora przy tej samej funkcji celu.

Aktualnie, wykonanie projektu procesowego instalacji biogazowni rolniczej (o mocy do 400 kW) jest w trakcie procedury przetargowej.

5.4. Pilotażowa mikrobiogazownia fermentacyjna

Opracowano założenia technologiczne budowy mikrobiogazowni i układu kogeneracyjnego. Wizualizację instalacji przedstawiono na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Wizualizacja pilotażowej biogazowni fermentacyjnej

Zastosowano modułową budowę linii technologicznej. Moduły stanowią spójny ciąg technologiczny dostępnych technik i technologii, które mogą być stosowane w biogazowniach przetwarzających substancje odpadowe z produkcji rolniczej i przemysłu rolno-spożywczego. Zaprezentowano możliwe rozwią-

onstrucyjne oraz techniczne instalacji o mocy elektrycznej do 50 kW. ienie sprzętowe uwzględnia rodzaj stosowanego substratu, warunki dozowania oraz mieszania w komorach fermentacyjnych i zagospoda pozostałości pofermentacyjnych. Przedstawiono rozwiązania możliwe osowania w przypadku najczęściej stosowanych i dostępnych substraszonek roślin (szczególnie kukurydzy), gnojowicy świńskiej, obornika go oraz wywaru gorzelnianego. Zaprezentowane rozwiązania odpowiajściowym parametrom technologicznym: moc całkowita biogazowni: od do 120 kW; fermentacja mokra o uwodnieniu początkowym substratu od raz obciążenie komór fermentacyjnych ładunkiem substancji organicz i poziomie ok. 2 kg s.m.o./m³.d.



Rys. 5.5. Agregat prądowórczy PBCHP10VB

t prądowórczy PBCHP10VB 5) zainstalowano na przycze- t wyposażony w silnik gazo- nożliwością zasilania gazem m, biogazem – o zawartości powyżej 55% – lub LPG. wadzone badania składu agregatu zasilanego LPG (4,9% O₂, 10,6% CO₂, ppm CO) – potwierdzają nie wymagań standardu ISO / ramach tematu – zgłoszenie we).

egat generuje moc 10 kW e elektrycznej i umożliwia sko- wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Podczas spalania paliwa ga- energia chemiczna paliwa zamieniana jest na energię mechaniczną, do napędzania prądnicy. Ze względu na ograniczenia termodynamiczne, ść silnika wynosi do 40%. Pozostała część energii chemicznej paliwa ana jest w ciepło odbierane przez wymienniki, które wykorzystuje się lukeji gorącej wody. W procesie wykorzystuje się ciepło uzyskane wylotowych, ale również z innych źródeł niskotemperaturowych agre- ch jak układ chłodzenia silnika i oleju smarnego. Ogólna sprawność go układu prądowórczego oscyluje w granicach 90%, a temperatura grzewanej w wymiennikach ciepła zawiera się w przedziale 70-80°C.

5.5. Literatura

1. Wojnowska-Baryła I., Bernat K. – Metody wstępnego przygotowania surowca do fermentacji. Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.A, 2010-2012.
2. Grajek W., Marecik R., Cyplik P. – Wpływ wyselekcjonowanych mikroorganizmów o wysokiej aktywności hydrolitycznej na efektywność I fazy fermentacji (prof. dr hab. inż. Włodzimierz Grajek, UP Poznań), Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.B, 2010-2012.
3. Chmielewski A.G., Urbaniak A., Wawryniuk K. – Zateżanie metanu w biogazie uzyskanym podczas fermentacji i kofermentacji odpadów lignocelulozowych. Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.A, 2010-2013
4. Klimiuk E., Pokój T., Bulkowska K., Gusiatiń M., Rynkowska S. – Fermentacja i współfermentacja odpadowej biomasy z przemysłu rolnospożywczego oraz pozyskiwanej z dedykowanych upraw energetycznych, Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.C, 2010-2012.
5. Jędrysek M-O., Biega B., Kuřka D. – Badania izotopowe ścieżek węgla i wodoru w fermentacji metanowej, Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.D, 2010-2013.
6. Zieliński M., Dębowski M., Krzemieniewski M. – Opracowanie układu technologicznego beztlenowych złóż biologicznych z mikrofalowym wspomaganie fermentacji, Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.E, 2010-2013.
7. Kardaś D., Klein M., Polesek-Karczewska S. – Termiczne przetwarzanie lignocelulozy dla procesu metanowej produkcji biogazu, Raporty wewnętrzne podetapu 4.2.F, 2010-2012.
8. Kwiatkowski J., Tworkowski J., Graban Ł., Lajszner Ł. – Zwiększenie potencjału płonowania ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* Rusby) z gruntów rolniczych, Raporty wewnętrzne podetapu 4.1.A, 2013.
9. Purwin C., Pysera B., Wyźlic I. – Konserwacja biomasy ślazuwca pozyskanej w różnych terminach jej zbioru, Raporty wewnętrzne podetapu 4.1.B, 2013.
10. Sienkiewicz S., Wierzbowska J., Krzebietke S., Żarczyński P. – Przydatność do nawożenia roślin energetycznych pozostałości pofermentacyjnych z produkcji biogazu, Raporty wewnętrzne podetapu 4.1.C, 2013.
11. Palige J., Chmielewski A.G. – Prace projektowo-konstrukcyjne biogazowni, Raporty wewnętrzne podetapu 2.1.B, 2012.
12. Pięćak A. – Pilotażowa mikrobiogazownia kogeneracyjna, Raporty wewnętrzne podetapu 2.2.B, 2012.
13. Wiśniewski D. – Energetyczne wykorzystanie odpadów z biogazowni, Raporty wewnętrzne podetapu 2.1.D, 2012.