



# Ocena efektywności pracy hybrydowego reaktora beztlenowego z mikrofalowym systemem ogrzewania

*Marcin Zieliński, Marcin Dębowski, Mirosław Krzemieniewski,  
Anna Grala, Magda Dudek  
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn*

## 1. Wstęp

Problematyka ochrony środowiska w zakładach przetwórstwa mleczarskiego obejmuje przede wszystkim gospodarkę wodno-ściekową. Dane literaturowe donoszą, że w polskich mleczarniach w ciągu doby powstaje od 450 do 600 m<sup>3</sup> ścieków [1, 9]. Zakłady przetwórstwa mleczarskiego cechują się zróżnicowaną produkcją, wytwarzają mleko, sery, jogurty, masło etc., dlatego skład generowanych przez nie ścieków jest także zróżnicowany [6]. Przemysł mleczarski generuje ścieki charakteryzujące się wysokimi wskaźnikami biologicznego i chemicznego zapotrzebowania na tlen (BZT i ChZT) [12]. W skład ścieków mleczarskich wchodzi przede wszystkim węglowodany, białka i tłuszcze zawarte w mleku, a także znaczne ilości detergentów, kwasów i zasad pochodzących z procesów czyszczenia chemicznego i płukania [10]. Oprócz wymienionych białek, węglowodanów i tłuszczów występują duże ilości azotu organicznego oraz jonów NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Fosfor występuje zarówno w formach organicznych jak i nieorganicznych, ponadto spotykane są pierwiastki: Na, K, Ca, Mg, Fe, Co, Ni i Mn. Duża zawartość sodu w ściekach świadczy o używaniu znacznych ilości alkalicznych środków czyszczących [8]. Ścieki mleczarskie dopływające do oczyszczalni ścieków, ze względu na wysokie stężenie związków organicznych, są przyczyną wielu problemów technologicznych i eksploatacyjnych [18]. Ko-

lejną przyczyną problemów są duże wahania sezonowe dopływających ścieków. Ilość wytworzonych ścieków skorelowana jest z ilością mleka dostarczanego do przetwórstwa, latem ilości te są znacznie większe niż zimą [6]. Stosowanie metod tlenowych ze względu na pęcznienie osadu i nadmierny przyrost ilości biomasy może okazać się mało wydajne. Metody te niosą ze sobą wysokie koszty instalacji i duże zużycie energii na napowietrzanie ścieków. Coraz częściej stosuje się metody beztlenowe, które przynoszą lepsze efekty oczyszczania ścieków charakteryzujących się dużą ilością związków organicznych [4, 23]. Laktoza – główny cukier zawarty w ściekach mleczarskich jest łatwo dostępna dla bakterii beztlenowych. Najważniejszym białkiem zawartym w mleku jest kazeina, degradacja kazeiny w reaktorach beztlenowych przebiega bardzo szybko i nie powoduje powstawania produktów hamujących fermentację metanową. Hamujący wpływ na przebieg procesu fermentacji wykazują tłuszcze mleka. Beztlenowa degradacja lipidów przebiega w dwóch etapach, w pierwszym na drodze hydrolizy powstaje glicerol i długołańcuchowe kwasy tłuszczowe, następnie przez reakcje  $\beta$ -oksydacji tworzy się octan i wodór. Powstający podczas pierwszego etapu glicerol nie wykazuje właściwości inhibitujących w przeciwieństwie do długołańcuchowych kwasów tłuszczowych, które opóźniają produkcję metanu [6].

Stosowane w oczyszczaniu ścieków mleczarskich metody anaerobowe wykorzystują nowoczesne reaktory beztlenowe [6, 23]. Wciąż poszukiwane są udoskonalenia stosowanych metod, które umożliwią szybsze i skuteczniejsze oczyszczanie ścieków mleczarskich. Jednym z takich usprawnień może okazać się zastosowanie promieniowania mikrofalowego.

Promieniowanie mikrofalowe może powodować różne efekty biologiczne, zależnie od natężenia pola, częstotliwości, formy fal, modulacji oraz czasu trwania ekspozycji. W przypadku oddziaływań na organizmy żywe wyróżnia się dwa rodzaje efektów – efekty termiczne i efekty nietermiczne (atermiczne). Oddziaływanie promieniowania mikrofalowego prowadzi do przekazywania energii i przeważnie powoduje podnoszenie temperatury, natomiast oddziaływania atermalne odnoszą się do efektów specyficznych dla mikrofal, których występowanie nie jest efektem podnoszenia temperatury [2].

W układach biologicznych promieniowanie mikrofalowe może być bezpośrednio absorbowane przez cząstki posiadające moment dipo-

lowy bądź może dochodzić do przekazywania energii przez nagrzany roztwór. W ciałach organicznych zawierających dużą ilość wody nie można w jednoznaczny sposób rozróżnić wpływu mikrofal z powodu dużej absorpcji jej cząsteczek. W układach biologicznych poddanych działaniu mikrofal obserwuje się różne efekty. Przykładowo wskazuje się na zmianę struktury i funkcji błon biologicznych. Badania autorów wskazują, iż w układach biologicznych służących do oczyszczania ścieków promieniowanie mikrofalowe powoduje wzrost różnorodności genetycznej populacji przyczyniający się do poprawy efektywności oczyszczania ścieków [20–22]. Wskazuje się również na możliwość powstawania w komórkach w wyniku ogrzewania mikrofalowego strefy o znacznie podwyższonej temperaturze, tzw. gorących punktów, które mogą prowadzić do denaturacji białek [16]. W prezentowanym w artykule rozwiązaniu reaktora beztlenowego ogrzewanego mikrofalowo RBM promieniowanie wykorzystywane jest do stymulacji procesu fermentacji metanowej.

Celem prowadzonych badań było określenie efektywności procesu fermentacji metanowej serwatki w temperaturze 35°C przy wykorzystaniu reaktora beztlenowego z mikrofalowym systemem ogrzewania. W trakcie prac realizowano dwa powiązane ze sobą cele badawcze: analizę efektywności pracy reaktora fermentacyjnego o nowatorskiej hybrydowej konstrukcji oraz badanie wpływu sposobu ogrzewania reaktora na przebieg procesu fermentacji metanowej. Warunki konstrukcyjne oraz technologiczne zastosowanego reaktora RBM pozwoliły na przeprowadzenie badań w warunkach ogrzewania konwekcyjnego oraz mikrofalowego.

## **2. Metodyka badań**

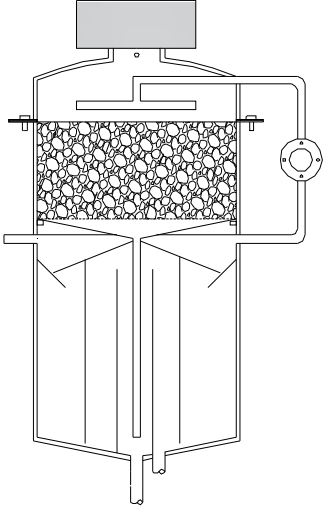
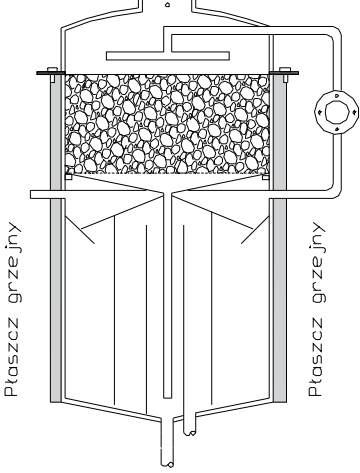
### **2.1. Organizacja badań**

W celu wykazania wpływu mikrofal na przebieg procesu fermentacji metanowej serwatki w warunkach mezofilowych badania prowadzono w dwóch wariantach, różniących się sposobem ogrzewania fermentorów. Objętość całkowita każdego z fermentorów wynosiła 100 L, z czego dolna część wynosiła 70 L, natomiast górna, wypełniona kształtkami, 30 L. W wariantcie I reaktor ogrzewany był przy wykorzystaniu generatora mikrofalowego, natomiast w II zastosowano płaszcz wodny, a ogrzewanie odbywało się na zasadzie konwekcji. W każdym z wariantów wyróżniono pięć serii różniących się wielkością dostarczanego ła-

dunku związków organicznych OLR w zakresie od 5 do 25 kg  $\text{ChZT}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . Schemat organizacji badań przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Schemat organizacji badań.

**Table 1.** Research organization chart

Wariant I (ogrzewanie mikrofalowe)	Wariant II (ogrzewanie konwekcyjne)
Seria 1 – OLR* = 5 kg $\text{ChZT}/\text{m}^3$ Seria 2 – OLR = 10 kg $\text{ChZT}/\text{m}^3$ Seria 3 – OLR = 15 kg $\text{ChZT}/\text{m}^3$ Seria 4 – OLR = 20 kg $\text{ChZT}/\text{m}^3$ Seria 5 – OLR = 25 kg $\text{ChZT}/\text{m}^3$	HRT** = 10,0 dni $Q_d = 10\text{L}/\text{d}$ HRT = 5,0 dni $Q_d = 20\text{L}/\text{d}$ HRT = 3,3 dni $Q_d = 30\text{L}/\text{d}$ HRT = 2,5 dni $Q_d = 40\text{L}/\text{d}$ HRT = 2,0 dni $Q_d = 50\text{L}/\text{d}$
<p>*OLR – organic loading rate (obciążenie ładunkiem zanieczyszczeń organicznych)</p> <p>**HRT – hydraulic retention time (hydrauliczny czas zatrzymania)</p>	
<p style="text-align: center;">Generator mikrofalowy</p>  <p style="text-align: center;"><b>Reaktor M</b> (ogrzewanie mikrofalowe)</p>	 <p style="text-align: center;"><b>Reaktor K</b> (ogrzewanie konwekcyjne)</p>

Czas trwania każdej z serii badawczych był różny zależnie od hydraulicznego czasu zatrzymania w danej serii. Przyjęto zasadę, iż pomiarów należy dokonywać przynajmniej przez czas odpowiadający pięciokrotnej wymianie całej objętości cieczy w reaktorze. Dla serii 1 było to 50 dni, dla serii 2 – 25 dni, dla serii 3 – 17 dni, dla serii 4 – 13 dni i dla serii 5 – 10 dni. Do zaszczepienia reaktora wykorzystano osad pochodzący z reaktora fermentacyjnego mezofilowego, w którym prowadzono beztlenowe oczyszczanie ścieków mleczarskich. Kolejne serie badawcze następowały po sobie od 1 do 5 wraz ze wzrastającym obciążeniem.

## 2.2. Substrat

Badania przeprowadzono wykorzystując modelowy roztwór serwatki sporządzony na bazie proszku. 1 g proszku serwatkowego rozpuszczono w 1 l wody co pozwoliło na uzyskanie roztworu, którego wartość ChZT wynosiła ok. 1000 mg O<sub>2</sub>/l. We wszystkich seriach badawczych wykorzystano analogicznie sporządzany modelowy roztwór serwatki. W celu uzyskania pożądanego obciążenia OLR zwiększano dobowy przepływ substratu przez reaktor, czego efektem był zmienny w kolejnych seriach hydrauliczny czas zatrzymania. Charakterystykę wykorzystywanego roztworu serwatkowego przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Charakterystyka wykorzystywanego roztworu serwatki

**Table 2.** Characteristics of whey solution used

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość średnia
1.	Chemiczne Zapotrzebowanie Tlenu ChZT	g ChZT/L	50.000 ±250
2.	Biochemiczne Zapotrzebowanie Tlenu BZT <sub>5</sub>	g BZT <sub>5</sub> /L	32.706 ± 189
3.	Azot całkowity	g N/L	2.500 ± 112
4.	Fosfor całkowity	g P/L	520 ± 48
5.	Odczyn	pH	7,12 ±0,12

## 2.3. Charakterystyka pracy reaktora

We wszystkich seriach badawczych utrzymywano mezofilowe warunki temperaturowe na poziomie 35°C. W wariacie II wskazania sondy temperaturowej umieszczonej we wnętrzu reaktora sterowały pracą przekąźnika, który uruchamiał grzałkę olejową podnoszącą temperaturę

w zbiorniku retencyjnym wody obiegowej płaszcza grzejnego. W wariantcie I ten sam układ sterujący uruchamiał generator mikrofalowy. Źródłem promieniowania mikrofalowego był magnetron o mocy elektrycznej 1,6 kW. Częstotliwość generowanego promieniowania wynosiła 2,45 GHz. W ciągu 1 sekundy pracy emitowane przez magnetron promieniowanie mikrofalowe powodowało podniesienie temperatury 1 dm<sup>3</sup> wody destylowanej o 0,1°C. Ciepło właściwe wody destylowanej wynosi 4186,8 J/kg·°C stąd podniesienie temperatury o 0,1°C wymaga dostarczenia 418,68 J energii w postaci promieniowania mikrofalowego zamienionego na energię cieplną. Wyliczona na tej podstawie sprawność magnetronu wynosiła 52%. Promieniowanie mikrofalowe wprowadzano do wnętrza reaktora za pomocą krótkiego falowodu. Pomiędzy reaktorem a generatorem mikrofal znajdowało się uszczelnienie pozwalające na przeniknięcie promieniowania, jednocześnie uniemożliwiające uchodzenie biogazu. Uszczelnienie wykonano z płytki PCV. Tworzywo sztuczne było przepuszczalne dla mikrofal, natomiast uszczelnienia z wysokotemperaturowego silikonu na krawędziach falowodu uniemożliwiały uchodzenie biogazu.

Serwatkę wprowadzano do reaktora równomiernie w ciągu doby z wydajnością od 10 L/d w serii 1 do 50L/d w serii 5 za pomocą pompy Allweiler typu ASL 10. Substrat dopływał od dołu reaktora, natomiast odpływ z części osadowej znajdował się w połowie wysokości reaktora. W części osadowej reaktora kierunek przepływu miał charakter zmienny. Najpierw ciecz płynęła ku górze, następnie w części środkowej opadała, by w części zewnętrznej ponownie przepływać do góry. W górnej strefie części osadowej zainstalowano łapacz osadu. Działanie łapacza opierało się na zasadzie ograniczenia przepływu poprzez zastosowanie stożkowej przegrody współpracującej z przegrodą zewnętrzną. Zestawione razem przegrody ograniczały przepływ jedynie do 5 mm szczeliny. Przepływ przez szczelinę był dodatkowo zmniejszany wysuniętą przegrodą zewnętrzną. Powyżej przegrody łapacza, poza odpływem, znajdowało się ujęcie ssawne dla pompy recyrkulującej ciecz nad warstwę wypełnienia. Pompa pracowała w sposób ciągły z wydajnością 0,69 l/min. Recyrkulowana ciecz przesączając się przez wypełnienie trafiała do leja zbiorczego pod rusztem podtrzymującym, a następnie odpływała na dno części osadowej reaktora. Wypełnienie reaktora miało postać plastikowych kul o średnicy 13 mm z nacięciami. Parametry wypełnienia przedstawiono w tabeli 3.

**Tabela 3.** Parametry wypełnienia**Table 3.** Filling parameters

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość
1.	Objętość całkowita wypełnienia $V_c$	l	48,0
2.	Powierzchnia wypełnienia $F_a$	$m^2$	0,19
3.	Powierzchnia właściwa wypełnienia $s$	$m^2/m^3$	300
4.	Średnica pojedynczej kuli wypełnienia $d$	mm	13,0

## 2.4. Metody pomiarowe

Pomiaru ilości powstającego biogazu dokonywano za pomocą przepływomierza masowego Allborg wyposażonego w odczyt wartości chwilowego przepływu oraz sumator.

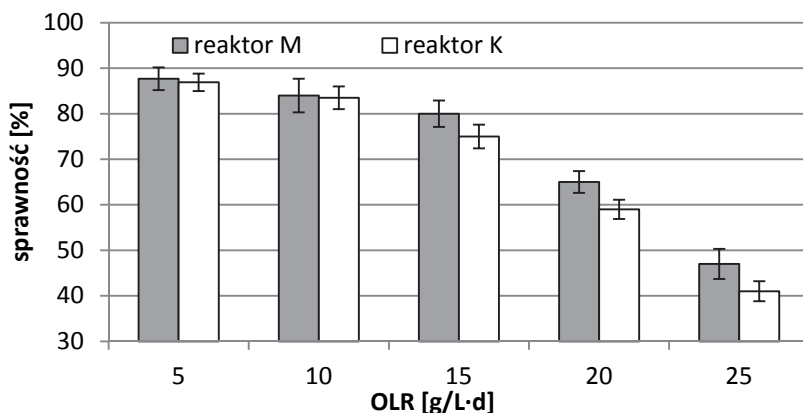
Pomiar, jakości biogazu realizowany był za pomocą miernika Lxi 430 firmy GasData. Raz na dobę dokonywano pomiaru zawartości procentowej (% v/v) następujących gazów:  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$  oraz zawartości zanieczyszczeń wyrażonej w ppm:  $H_2S$ ,  $NH_3$ . Okresowo dokonywano sprawdzenia poprawności wskazań miernika za pomocą chromatografu gazowego GC Agilent 7890 A. Chromatograf wyposażony był w detektor termokonduktometryczny (TCD) – w którym pomiar odbywa się poprzez analizę zmian przewodnictwa elektrycznego wynikającego ze zmian przewodnictwa cieplnego atmosfery wokół termoelementu w momencie gdy w gazie nośnym (hel) pojawiają się badane związki chemiczne. Wielkość zmian przewodnictwa cieplnego była wprost proporcjonalna do stężenia badanych składników biogazu. Określano zawartość procentową następujących składników biogazu: metan  $CH_4$ , dwutlenek węgla  $CO_2$ , tlen  $O_2$  i wodór  $H_2$ .

W trybie ciągłym analizowano zmiany wartości pH we wnętrzu reaktora. W cieczy odpływającej z reaktora analizowano codziennie wartość ChZT (metodą dwuchromianową), i zawartość zawiesiny ogólnej.

Do obliczeń statystycznych uzyskanych wyników wykorzystano program Statistica 9.0. Do sprawdzenia jednorodności wariancji w grupach (poszczególnych seriach) wykorzystano test Levene'a. W celu sprawdzenia istotności między analizowanymi seriami wykorzystano test rozsądnej istotnej różnicy RIR Tukeya. W testach przyjęto poziom istotności na poziomie  $\alpha = 0,05$ .

### 3. Wyniki badań

Sprawność usuwania związków organicznych określonych za pomocą ChZT zmieniała się w kolejnych seriach badawczych od średniej 87,7% w serii 1 w reaktorze ogrzewanym mikrofalowo do 41% w serii 5 przy zastosowaniu reaktora ogrzewanego konwekcyjnie. We wszystkich seriach badawczych większa skuteczność obserwowana była w reaktorze ogrzewanym mikrofalowo, przy czym statystycznie istotne było to w serii 3, 4 i 5. Przykładowo w serii 3 średnia sprawność usuwania ChZT wynosiła w reaktorze M wynosiła średnio 80%, podczas gdy w reaktorze K była o około 5% mniejsza (rys. 1).



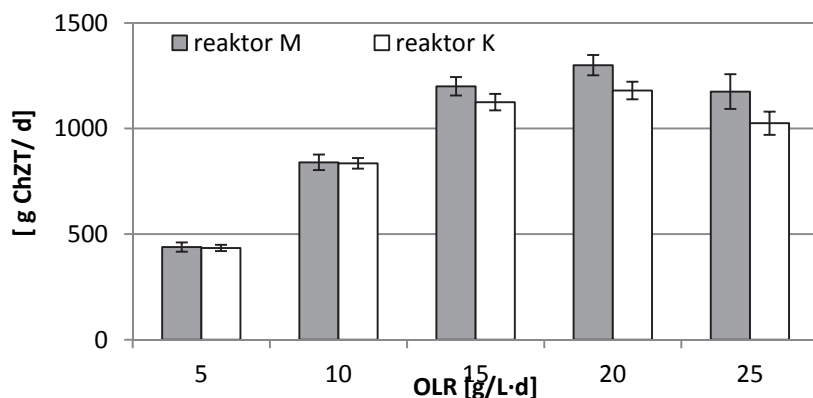
**Rys. 1.** Sprawność zmniejszania wartości ChZT w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania reaktora

**Fig. 1.** Reduction efficiency of COD in the series of test depending on the heating method of the reactor

Ilość usuwanego ładunku związków organicznych zależała od obserwowanej sprawności (rys. 1) oraz od wprowadzanego w kolejnej serii badawczej ładunku. Największy ładunek związków organicznych był usuwany w serii 4. Z technologicznego punktu widzenia najefektywniejsze było obciążenie zastosowane w serii 3. Usunięty ładunek wynosił w tych warunkach ok. 1200 g ChZT/d w przypadku reaktora ogrzewanego mikrofalowo i 1125 g ChZT/d w reaktorze ogrzewanym konwekcyjnie. W serii 4 wielkość usuwanego ładunku była większa ale jakość oczyszczonych ścieków była na istotnie mniejszym poziomie, co oznacza, że



znaczna ilość materii organicznej odpływała z układu (rys. 2). Seriach 3, 4 i 5 obserwowano statystycznie istotne większe usunięcie ładunku związków organicznych w reaktorze ogrzewanym mikrofalowo.



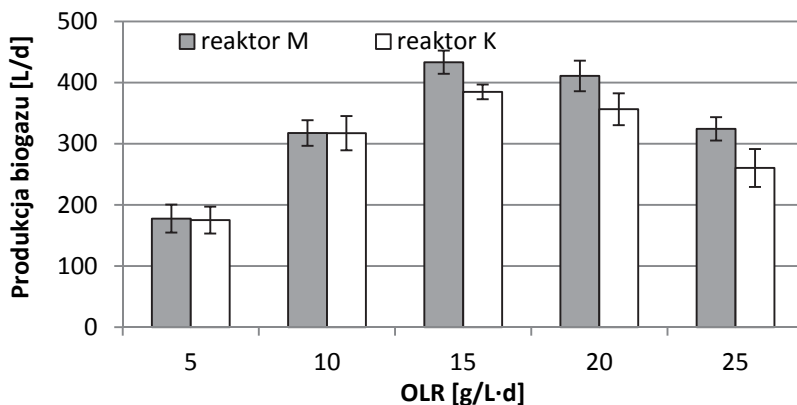
**Rys. 2.** Ilość usuniętego ładunku ChZT w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania reaktora

**Fig. 2.** Amount removed COD load test in the series depending on the heating method of the reactor

Analizując ilości biogazu wytworzone w kolejnych seriach badawczych stwierdzono, że najwięcej biogazu powstawało w serii 3 gdy obciążenie reaktora było na poziomie 15 g ChZT/(L·d). W tych warunkach wytworzono średnio 433 L biogazu/d przy zastosowaniu reaktora ogrzewanego mikrofalowo oraz 384 L biogazu/d w reaktorze ogrzewanym konwekcyjnie. Najmniejsze wartości ilości biogazu obserwowano w serii 1, przy czym w tym przypadku nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy ilością produkowanego biogazu, a sposobem ogrzewania reaktora (rys. 3).

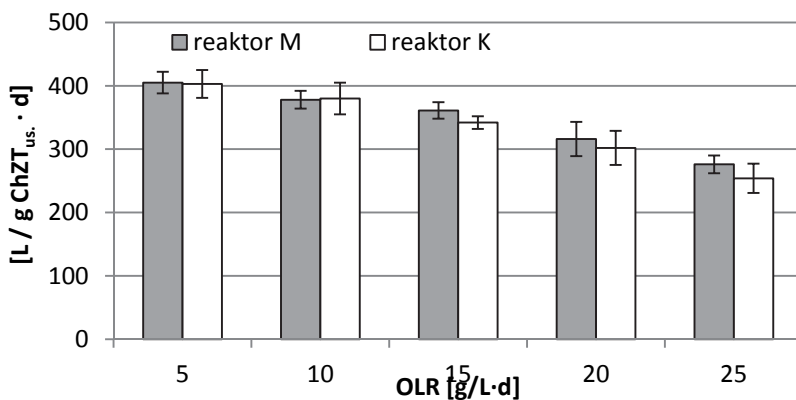
Istotnym parametrem charakteryzującym przebieg procesu fermentacji jest współczynnik produkcji biogazu. Charakteryzuje on ilość produkowanego biogazu w odniesieniu do rozłożonego ładunku związków organicznych. Pod względem tego parametru największą wartość zaobserwowano w serii 1. Przy najmniejszym z testowanych obciążeń stwierdzono wartość współczynnika około  $y_b = 405 \text{ L}/(\text{g ChZT}_{\text{us}} \cdot \text{d})$ , niezależnie od zastosowanego sposobu ogrzewania reaktora. Istotne statystycznie różnice w wielkości tego współczynnika stwierdzono dopiero przy obciążeniu równym 15 g/(L·d). W reaktorze ogrzewanym mikrofa-

lowo uzyskiwano średnio 361 litrów biogazu z 1 g usuniętego ładunku ChZT, podczas gdy w reaktorze ogrzewanym konwekcyjnie było to około 342 L/(g ChZT<sub>us</sub>·d) (rys. 4).



**Rys. 3.** Objętość biogazu produkowanego w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania reaktora

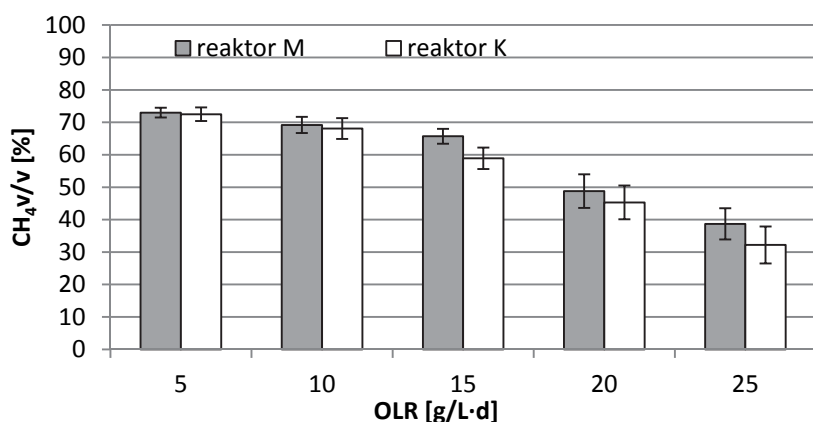
**Fig. 3.** Volume of biogas production in the series of test depending on the heating method of the reactor



**Rys. 4.** Wartość współczynnika produkcji biogazu w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania reaktora

**Fig. 4.** Coefficient of biogas production in the series of test depending on the heating method of the reactor

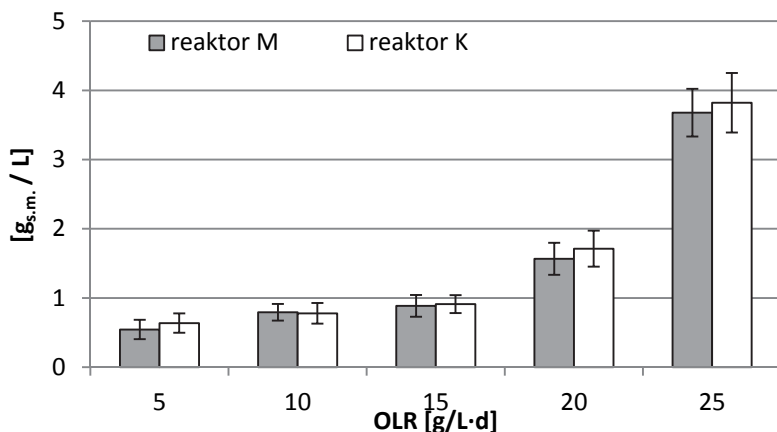
Zawartość metanu w powstającym biogazie zależała od obciążenia reaktora ładunkiem zanieczyszczeń. Największą zawartość metanu stwierdzono w serii 1 osiągając ok. 73%. Nie stwierdzono w tej serii zależności pomiędzy sposobem ogrzewania reaktora, a zawartością metanu w biogazie. W kolejnych seriach badawczych zawartość metanu w biogazie obniżała się, przy czym statystycznie istotna różnica była obserwowana pomiędzy wartościami w serii 3 i 4 (rys. 5). Znaczące obniżenie zawartości metanu w biogazie stwierdzono w serii 4 przy obciążeniu reaktora na poziomie 20 g  $\text{CH}_2\text{T}/(\text{L}\cdot\text{d})$ .



**Rys. 5.** Zawartość metanu w biogazie w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania reaktora

**Fig. 5.** The methane content of the biogas in the series of test depending on the heating method of the reactor

Istotnym aspektem służącym ocenie funkcjonowania prezentowanego rozwiązania reaktora jest określenie zawartości zawiesin w cieczy odpływającej z reaktora. W przypadku, gdy ilość odpływającej biomasy przekraczałaby przyrost w reaktorze prowadziłoby to do wymywania biomasy i spadku efektywności jego funkcjonowania. Konstrukcja separatora osadu była identyczna w obu reaktorach, a sposób ogrzewania reaktora nie miał znaczenia dla ilości zawiesin obserwowanych w odpływie. Ilość odpływających zawiesin wzrastała w kolejnych seriach badawczych od około 0,6 g/l w serii 1 do ponad 3,8 g/L w ostatniej serii badawczej (rys. 6).



**Rys. 6.** Zawartość zawiesin ogólnych w cieczy odpływającej z reaktora w kolejnych seriach badawczych w zależności od sposobu ogrzewania  
**Fig. 6.** The content of suspended solids in the liquid flowing out of the reactor in the series of test depending on the heating method of the reactor

#### 4. Dyskusja wyników

Dostarczenie promieniowania mikrofalowego pozytywnie wpłynęło na efektywność usuwania związków organicznych w układzie ogrzewanym mikrofalowo. W układzie tym uzyskano większą efektywność usuwania związków organicznych w porównaniu do systemu ogrzewanego konwekcyjnie we wszystkich przeprowadzonych seriach badawczych i największą koncentrację metanu w biogazie. Uzyskane wyniki dowodzą iż zastosowanie mikrofal w oczyszczaniu ścieków może okazać się efektywnym usprawnieniem klasycznie stosowanych metod.

Monroy i in. oczyszczali ścieki pochodzące z produkcji lodów w reaktorze beztlenowym uzyskali 70% sprawność usuwania zanieczyszczeń organicznych przy średnim obciążeniu  $5,5 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  [11]. Analizą procesów oczyszczania ścieków pochodzących z produkcji sera zajęli się Ozturk i in. osiągając 85–99% efektywność usuwania związków organicznych, przy obciążeniu od 2 do  $7,3 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . Do swoich badań wykorzystali reaktor hybrydowy UASB [13]. Wielu badaczy ukazuje zalety metod kombinowanych oczyszczania ścieków. Trawfik i in. zauważają że aby podnieść sprawność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków mleczarskich, można stosować reaktor UASB łącznie z systemem AS. Takie kombinowane systemy mogą podnieść sprawność usu-

wania zanieczyszczeń do 99% [17]. Rajesh Banu i in. zauważyli że aby poprawić efektywność oczyszczania ścieków mleczarskich, można zastosować rozwiązania hybrydowe, takie jak usprawnienie działania reaktora UASB reakcjami fotochemicznymi, dzięki czemu można uzyskać 94% sprawność procesu usuwania zanieczyszczeń ze ścieków [14]. W reaktorach hybrydowych stosowanych przez Calli i in. do oczyszczania ścieków z produkcji sera, uzyskano efektywność usuwania związków organicznych na poziomie 95% przy obciążeniu  $11 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  [5]. Oprócz reaktorów UASB wysoką wydajność oczyszczania ścieków mleczarskich zapewniają reaktory typu ASBR. Badania prowadzone przez Banika i in. dowiodły, że zastosowanie reaktora ASBR do oczyszczania ścieków syntetycznych, w których jako substrat posłużyło sproszkowane mleko, umożliwia usuwanie związków organicznych do ok. 62% [3]. Ramasamy i in. stosując w swoich badaniach reaktor ASBR do oczyszczania syntetycznych ścieków mleczarskich, w których stężenie dopływającego substratu wynosiło  $10 \text{ g}_{\text{ChZT}}/\text{dm}^3$ , uzyskali efektywność usuwania zanieczyszczeń organicznych w przedziale od 90–97% [15]. Gannoun i in. przeprowadzili proces fermentacji serwatki w reaktorze typu UAF uzyskując wielkość usuniętego ładunku zanieczyszczeń na poziomie 95% przy obciążeniu wynoszącym  $15 \text{ g}_{\text{ChZT}}/\text{l}$ , zwiększając obciążenie do  $20 \text{ g}_{\text{ChZT}}/\text{l}$  zaobserwowano spadek efektywności do 72%. Największą ilość metanu  $280 \text{ ml}_{\text{CH}_4}/(\text{g}_{\text{usChZT}})$  w powstającym biogazie uzyskano przy  $\text{HRT} = 3 \text{ d}$  oraz  $\text{OLR} = 5 \text{ g}_{\text{ChZT}}/\text{l}$  [7]. Zielińska i in. analizowali wpływ temperatury, obciążenia reaktora i sposobu ogrzewania na wielkość produkcji biogazu i występowanie określonych form bakterii metanogennych w hybrydowym reaktorze beztlenowym oczyszczającym ścieki mleczarskie. Wykorzystali reaktor RBM ogrzewany w analogiczny sposób jak w przypadku badań własnych tj. mikrofalowo i konwekcyjnie. Przetestowali dwie temperatury:  $35^\circ\text{C}$  i  $55^\circ\text{C}$  oraz dwa obciążenia  $1 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  i  $2 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ . Uzyskane przez nich wyniki badań korelują z badaniami autorów opisanymi w niniejszym artykule, największą produkcję biogazu o zawartości ok 67% odnotowali w przypadku temperatury mezofilowej w reaktorze ogrzewanym mikrofalowo przy obciążeniu  $1 \text{ kg}_{\text{ChZT}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ , zwiększenie obciążenia spowodowało spadek produkcji biogazu i zawartości metanu [19]. W badaniach własnych największą ilość metanu zaobserwowano w 1 serii badawczej, w której obciążenie było najmniejsze.

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, iż zastosowane ogrzewania mikrofalowego wpłynęło w istotny sposób na efektywność unieszkodliwiania serwatki, przy czym efekt ten był obserwowany w większych zakresach obciążeń reaktora (serie 3,4,5). Dzięki zastosowaniu promieniowania mikrofalowego stwierdzono istotnie większą ilość powstającego biogazu oraz efektywność usuwania ChZT przy obciążeniu 15 g ChZT/(L·d) i większym. Najbardziej efektywne pod względem technologicznego funkcjonowania reaktora było obciążenie 15 g ChZT/(L·d). W tych warunkach uzyskano wysoką efektywność usuwania zanieczyszczeń przy znacznej ilości produkcji biogazu o wysokiej zawartości metanu. Jednocześnie stężenie zawiesin ogólny w odpływie nie przekraczała 1000 mg/L.

*Opisane badania były finansowane z budżetu Zadania Badawczego nr 4 pt. "Opracowanie zintegrowanych technologii wytwarzania paliw i energii z biomasy, odpadów rolniczych i innych" w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: "Zaawansowane technologie pozyskiwania energii" realizowanego ze środków NCBiR i ENERGA S.A.*

## Literatura

1. **Anielak A.M.:** *Gospodarka wodno-ściekowa przemysłu mleczarskiego.* Agro Przemysł, 2, 57–59 (2008).
2. **Banik G. C., Dague R. R.:** *ASBR treatment of low strength industrial wastewater at psychrophilic temperatures.* Water Science Technology, 36, 337–44 (1997).
3. **Banik S., Bandyopadhyay S., Ganguly S.:** *Bioeffects of microwave – a brief review.* Bioresource Technology, 87, 155–159 (2003).
4. **Banu J.R., Anandan S., Kaliappan S., Yeom I.T.:** *Treatment of dairy wastewater using anaerobic and solar photocatalytic methods.* Solar Energy, 82, 812–819 (2008).
5. **Calli B., Yukselen M. A.:** *Anaerobic treatment by a hybrid reactor.* Environmental Engineering Science, 19, 143–50 (2002).
6. **Demirel B., Yenigun O., Onay T.T.:** *Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review.* Process Biochemistry, 40, 2583–2595 (2008).

7. **Gannoun H., Khelifi E., Bouallagui H., Touhami Y., Hamdi M.:** *Ecological clarification of cheese whey prior to anaerobic digestion in upflow anaerobic filter.* *Bioresource Technology*, 99, 6105–6111 (2008).
8. **Guillen-Jimenez E., Alvarez-Mateos P., Romero-Guzman F., Pereda-Martin J.:** *Bio-mineralization of organic matter as affected by pH. The evolution of ammonium and phosphates.* *Water Research*, 34, 1215–1224 (2000).
9. **Heaven M.W., Wild K., Verheyen V., Cruickshank A., Watkins M., Nash D.:** *Seasonal and wastewater stream variation of trace organic compounds in a dairy processing plant aerobic bioreactor.* *Bioresource Technology*, 102, 7727–7736 (2011).
10. **Luo J., Ding L., Qi B., Jaffrin M.Y., Wan Y.:** *A two-stage ultrafiltration and nanofiltration process for recycling dairy wastewater.* *Bioresource Technology*, 102, 7437–7442 (2011).
11. **Monroy O., Johnson K. A., Wheatley A. D., Hawkes F., Caine M.:** *The anaerobic filtration of dairy waste: results of a pilot trial.* *Bioresource Technology*, 50, 243–51 (1994).
12. **Orhon D., Gorgun E., Germirli F., Artan N.:** *Biological treatability of dairy wastewater.* *Water Research*, 27, 625–633 (1993).
13. **Ozturk I., Eroglu V., Ubay G., Demir I.:** *Hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor (HUASBR) treatment of dairy effluents.* *Water Science Technology*, 28, 77–85 (1993).
14. **Rajesh Banu J., Anadan S., Kaliappan S., Ick-Tae Y.:** *Treatment of dairy wastewater using anaerobic and solar photocatalytic method.* *Solar Energy*, 82, 812–819 (2008).
15. **Ramasamy E. V., Gajalakshmi S., Sanjeevi R., Jithesh M. N., Abbasi S. A.:** *Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors.* *Bioresource Technology*, 93, 209–212 (2004).
16. **Shazman A., Mizrahi S., Cogan U., Shimoni E.:** *Examining for possible non-thermal effects during heating in a microwave oven.* *Food Chemistry*, 103, 444–453 (2007).
17. **Trawfik A., Sobhey M., Badawy M.:** *Treatment of a combined dairy and domestic wastewater in a up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor by activated sludge (AS System).* *Desalination*, 227, 167–177 (2008).
18. **Vidal G., Carvalho A., Mendez R., Lema J.M.:** *Influence of the content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewaters.* *Bioresource Technology*, 74, 231–239 (2000).
19. **Zielińska M., Cydzik-Kwiatkowska A., Zieliński M., Dębowski M.:** *Impact of temperature, microwave radiation and organic loading rate on methanogenic community and biogas production during fermentation of dairy wastewater.* *Bioresource Technology*, 129, 308–314 (2013).

20. Zielinski M., Zielinska M.: *Impact of microwave radiation on nitrogen removal and quantity of nitrifiers in biofilm*. Canadian Journal of Civil Engineering, 37, 4, 661–666 (2010).
21. Zieliński M., Zielińska M., Dębowski M.: *Application of microwave radiation to biofilm heating during wastewater treatment in trickling filters*. Bioresource Technology, 127, 223–230 (2013).
22. Zieliński M., Ciesielski S., Cydzik-Kwiatkowska A., Turek J., Dębowski M.: *Influence of microwave radiation on bacterial community structure in biofilm*. Process Biochemistry, 42, 1250–1253 (2007).
23. Zieliński M., Dębowski M., Krzemieniewski M.: *Możliwość beztlenowej biodegradacji zanieczyszczeń zawartych w permeacie po nanofiltracji serwatki kwaśnej*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 9, 199–210 (2007).

## Evaluation of the Efficiency of Anaerobic Hybrid Reactor with Microwave Heating System

### Abstract

Used in wastewater treatment anaerobic dairy use modern methods of anaerobic reactors. Improvements are still sought methods that will enable faster and more efficient dairy wastewater. One of these improvements can be applied to microwave radiation. The solution presented in the article RBM<sub>C</sub> microwave reactor is used to stimulate the anaerobic digestion process. The obtained results allow to evaluate the potential use of microwaves to the development of thermal conditions in a reactor operating at an industrial scale. The aim of this study was to determine the effectiveness of the methane fermentation of whey at a temperature of 35 ° C using an anaerobic reactor with microwave heating system. In the course of the work carried out two related research objectives: the analysis of the efficiency of the fermentation reactor with an innovative hybrid design and study the impact of the method of heating the reactor to the process. Terms construction and reactor technology used RBM<sub>C</sub> allowed to conduct research in a convection heating and microwave. Conducted research aimed to validate or exclude the presence athermal effects of microwave effects on the process of wastewater treatment.

In order to demonstrate the effect of microwaves on the process of anaerobic digestion of whey in mesophilic conditions, tests were carried out in two stages with different heating process of fermentation. In the first stage, the reactor was heated using a microwave generator, while the second uses a water jacket, and the heating takes place by convection. In each of the stages identi-



fied five series of different sizes of cargo delivered OLR organic compounds in the range of 5 to 25 kg<sub>COD</sub>/(m<sup>3</sup>·d).

The analyzes carried out showed that the applied microwave heating significantly affect the efficiency of whey disposal, but this effect was observed in the higher ranges of the reactor load (series 3, series 4, series 5). The use of microwave radiation had a significantly higher number of resulting biogas and removal efficiency of chemical oxygen demand at a load of 15 g<sub>COD</sub>/(L·d) and higher. The most effective in terms of technological operation of the reactor was load of 15 g<sub>COD</sub>/(L·d) Under these conditions, resulting in high efficiency contaminant removal with a considerable amount of biogas rich in methane. At the same time the concentration of total suspended solids in the effluent did not exceed 1000 mg/L. The results show that the use of microwaves in wastewater treatment may be an effective improvement classic methods.