

Marcin Zieliński, Marcin Dębowski, Marta Kisielewska

Skuteczność wytwarzania biogazu z wybranych gatunków roślin energetycznych w procesie fermentacji metanowej wspomaganą promieniowaniem mikrofalowym

Ograniczone zasoby konwencjonalnych nośników energii, jak również ich rosnące zużycie, skłaniają do podejmowania badań nad rozwojem biotechnologicznych metod pozyskiwania paliw. Biopaliwa są wytwarzane z biomasy, przy czym największe nadzieje wiąże się z produkcją biopaliw z odpadowej biomasy pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, w tym biomasy powstającej z upraw roślin energetycznych, które charakteryzują się szybkim tempem wzrostu, dużą odpornością na szkodniki i choroby oraz niewielkimi wymaganiami co do jakości gleby [1]. Uprawa niektórych gatunków roślin energetycznych umożliwia również zagospodarowanie nieużytków rolnych lub obszarów zdegradowanych, z uwagi na zdolność do akumulacji zanieczyszczeń w ich systemie korzeniowym [2]. Spośród wielu gatunków roślin energetycznych, możliwych do uprawy w Polsce, najczęściej polecane są kukurydza (*Zea mays*), miskant olbrzymi (*Miscanthus x giganteus*) i ślazo-wiec pensylwański (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) [3].

Technologie biogazowania roślin energetycznych rozwijane są już od lat 30. ubiegłego wieku. Proces fermentacji metanowej to obecnie dobrze poznana technologia, jednak wciąż poszukuje się skutecznych, niskonakładowych i innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjno-eksploatacyjnych oraz usprawniających procesy biochemiczne wytwarzania biometanu z roślin energetycznych [4, 5]. Szczególnie istotne są parametry ekonomiczne biogazowni, rozpatrywane łącznie ze wskaźnikami środowiskowymi, takimi jak zużycie energii czy wody [6], przy czym należy pamiętać, że w procesie fermentacji metanowej biomasy powstają odpady płynne, których jedynym racjonalnym sposobem utylizacji jest rolnicze wykorzystanie, z zachowaniem zasad określonych w Kodeksie Dobrej Praktyki Rolniczej [7].

W niniejszej pracy zaproponowano innowacyjny sposób ogrzewania reaktorów beztlenowych do biogazowania biomasy roślin energetycznych za pomocą promieniowania mikrofalowego. Stosowanie takiego rozwiązania w skali technicznej pozwoliłoby na wyeliminowanie problemów technologicznych spotykanych podczas eksploatacji wymienników ciepła, płaszczy wodnych czy iniektorów pary. Stosując do ogrzewania mikrofałe możliwe jest skierowanie energii bezpośrednio do mieszaniny osadu beztlenowego i przetwarzanej biomasy, przez co unika się strat ciepła w wyniku jego pochłaniania przez inne elementy konstrukcyjne reaktora, co z kolei przekłada się na oszczędności

w zużyciu energii. Doniesienia literaturowe wskazują również na atermiczne (niezwiązane ze wzrostem temperatury) efekty oddziaływania promieniowania mikrofalowego w układach biologicznych [8, 9]. Badania wykazały, że przy małych dawkach energii mikrofał obserwowano wzrost aktywności biologicznej mikroorganizmów oraz oddziaływanie na ich skład gatunkowy i liczebność populacji [10, 11].

Celem badań było określenie wpływu zastosowania elektromagnetycznego promieniowania mikrofalowego, jako czynnika stymulującego warunki termiczne w reaktorach beztlenowych, na skuteczność wytwarzania biogazu i metanu w procesie fermentacji metanowej biomasy pięciu wybranych gatunków roślin energetycznych. Otrzymane wyniki porównano z rezultatami uzyskanymi w reaktorach ogrzewanych w sposób tradycyjny.

Materiały i metody

Analizę wydajności wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej przeprowadzono z udziałem pięciu substratów roślinnych – kiszonki kukurydzy (*Zea mays*), kiszonki lucerny (*Medicago* L.), kiszonki ślazuwca pensylwańskiego (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), kiszonki miskanta olbrzymiego (*Miscanthus x giganteus*) oraz sianokiszonki. Kiszonki roślin energetycznych pochodziły ze Stacji Dydaktyczno-Badawczej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Bałdach (województwo warmińsko-mazurskie). Badania prowadzono stosując dwa sposoby ogrzewania laboratoryjnych reaktorów fermentacyjnych – konwencjonalne (etap I) i mikrofalowe (etap II).

Analizowane substraty roślinne w pierwszej kolejności rozdrabniano mechanicznie i homogenizowano za pomocą młynka tnącego ROBO 3000. Jednorazowo do młynka wprowadzano około 100 g świeżej masy danego substratu, a następnie rozdrabniano przez 5 min w celu uzyskania średniego wymiaru cząstek w zakresie 2,0÷3,0 mm. Tak przygotowane substraty mieszano z 200 cm³ inokulumu i wytrząsano przez 30 min w urządzeniu laboratoryjnym z prędkością 160 obr./min przez 20 min. Osad beztlenowy (inokulum) wykorzystywany w badaniach, o charakterystyce podanej w tabeli 1, pochodził z modelowego reaktora fermentacyjnego o pojemności czynnej 300 dm³, w którym substratem fermentacyjnym była mieszanina gnojowicy bydłowej i kiszonki ślazuwca pensylwańskiego. Reaktor pracował z obciążeniem ładunkiem związków organicznych (w odniesieniu do suchej masy organicznej) równym 2,0 kg/(m³d). Osad fermentacyjny wykorzystywany jako inokulum był wstępnie fermentowany przez 10 d przed

Tabela 1. Charakterystyka osadu beztlenowego, stanowiącego inokulum reaktorów
Table 1. Characteristics of anaerobic sludge used as inoculum for reactors

Wskaźnik, jednostka	Wartość
Sucha masa, %	6,01 ± 0,18
Sucha masa organiczna*, %	74,42 ± 3,13
Azot całkowity*, mgN/g	33,08 ± 2,85
Fosfor ogólny*, mgP/g	2,01 ± 0,19
Węgiel ogólny*, mgC/g	472,05 ± 23,34
Ogólny węgiel organiczny*, mgC/g	343 ± 30,25
pH	7,03 ± 0,12

*w odniesieniu do suchej masy osadu

wprowadzeniem do reaktorów beztlenowych. W tym czasie osad był mieszany i termostatowany w warunkach mezofilowych, bez dodatku substancji pokarmowych. Charakterystykę surowców fermentacyjnych z inokulum podano w tabeli 2.

Biomasę roślinną wymieszaną z inokulum wprowadzano do reaktorów respirometrycznych, które składały się z komór reakcyjnych o pojemności czynnej 0,5 dm³, połączonych szczelnie z urządzeniami pomiarowymi do rejestrowania zmian ciśnienia cząstkowego wywołanego wytwarzaniem biogazu. We wszystkich eksperymentach początkowa ilość związków organicznych w każdym reaktorze (w odniesieniu do suchej masy organicznej osadu) wynosiła około 5,0 g/dm³. W celu zapewnienia warunków beztlenowych, przed rozpoczęciem testów reaktor przedmuchiowano azotem. Reaktory respirometryczne były umieszczone w cieplarni (etap I) lub w komorze mikrofalowej (etap II). Badania prowadzono w temperaturze 35 °C (fermentacja mezofilowa), czas pomiaru wynosił 40 d, a wartości zmian ciśnienia w komorach rejestrowano co 160 min. Badania wykonano w trzech powtórzeniach.

Źródłem promieniowania o częstotliwości 2,45 GHz był generator mikrofalowy (Plazmotronika) o mocy dostępnej w zakresie 0÷600 W. Podniesienie temperatury reaktora o 0,1 °C wymagało dostarczenia energii cieplnej promieniowania około 420 J/kg. Promieniowanie dostarczano aż do uzyskania pożądanej temperatury, następnie generator mikrofal był uruchamiany okresowo w celu podtrzymania zadanej temperatury we wnętrzu naczyń pomiarowych. Konstrukcja komory mikrofalowej pozwoliła na umieszczenie w jej wnętrzu jedynie szklanych naczyń pomiarowych, dlatego miernik ciśnienia znajdował się powyżej strefy oddziaływania mikrofal.

Ilość wytworzonego biogazu wyliczono na podstawie równania gazu doskonałego, mierząc wartości zmiany ciśnienia we wnętrzu komory pomiarowej i obliczając objętość powstałego biogazu w warunkach normalnych. Skład chemiczny powstającego biogazu ustalono za pomocą analizatora GMF 430 (Gas Data) oraz chromatografu gazowego (GC 7890 A Agilent) wyposażonego w dwie kolumny Hayesep Q (80/100), dwie kolumny z sitem molekularnym (60/80) oraz kolumnę Porapak Q (80/100). Temperatura portów wtrysku i detektora wynosiła odpowiednio 150 °C i 250 °C. Jako gazy nośne zastosowano hel i argon (strumień objętości 15 cm³/min).

Zawartość suchej masy w mieszaninie osadu i surowca roślinnego na początku procesu i po 40 d fermentacji metanowej oznaczono metodą grawimetryczną. Próbkę wysuszoną w temperaturze 105 °C badano także na zawartość węgla ogólnego, ogólnego węgla organicznego i azotu ogólnego za pomocą analizatora Flash 2000 (Thermo Scientific). Wartość pH zhomogenizowanych próbek określano z użyciem miernika 1000 L (VWR), natomiast ChZT przesącza oznaczano za pomocą spektrofotometru DR 2800 (HACH Lange).

Wartości stałej szybkości reakcji wytwarzania biogazu wyznaczono metodą regresji nieliniowej, zaś jako miarę dopasowania krzywej (przy wyznaczonych parametrach)

Tabela 2. Charakterystyka osadu beztlenowego z substratami roślinnymi na początku eksperymentu (start) oraz po 40 dobach fermentacji metanowej w reaktorach ogrzewanych konwencjonalnie (etap 1) i mikrofalami (etap 2)

Table 2. Characteristics of the anaerobic sludge with energy crops at the beginning of the experiment (start) and after 40 days of methane fermentation in conventionally heated (step 1) and microwave-heated (step 2) reactors

Substrat roślinny Etap badań		Wskaźnik, jednostka						
		Uwodnienie, %	Sucha masa, %	Węgiel ogólny*, mgC/g	Ogólny węgiel organiczny*, mgC/g	Azot ogólny*, mgN/g	ChZT, gO ₂ /dm ³	pH
Kiszonka kukurydzy	start	97,81	2,19	427	388	52	13,89	7,48
	I	98,82	1,18	325	205	32	10,25	7,22
	II	98,77	1,23	282	171	41	9,82	7,37
Kiszonka lucerny	start	97,19	2,81	429	344	62	14,03	7,42
	I	97,79	2,21	371	213	57	10,66	7,47
	II	97,58	2,42	374	209	44	10,12	7,50
Kiszonka ślazuwca	start	97,27	2,73	435	387	51	13,47	7,48
	I	97,67	2,33	327	202	41	10,23	7,20
	II	97,99	2,01	325	207	43	9,95	7,38
Kiszonka miskanta	start	97,31	2,69	412	368	53	13,65	7,48
	I	97,87	2,13	321	202	47	9,74	7,40
	II	98,02	1,98	284	166	38	7,73	7,29
Sianokiszonka	start	97,29	2,71	434	389	51	13,42	7,23
	I	97,59	2,41	327	219	49	11,08	7,33
	II	97,43	2,57	318	206	48	10,71	7,41

*w odniesieniu do suchej masy osadu

Tabela 3. Wydajność wytwarzania biogazu i metanu oraz skład biogazu powstającego podczas fermentacji metanowej wybranych roślin energetycznych

Table 3. Efficiency of biogas and methane production as well as composition of the biogas produced during methane fermentation of selected energy crops

Etap badań	Średnia wydajność wytwarzania gazu		Średni skład objętościowy biogazu				
	biogaz*, dm ³ /kg	metan*, dm ³ /kg	CH ₄ , %	CO ₂ , %	H ₂ S, ppm	H ₂ , ppm	NH ₃ , ppm
kiszonka kukurydzy							
I	680	361	53,0	46,9	50	23	473
II	720	426	59,1	40,8	63	31	399
kiszonka lucerny							
I	331	181	54,9	45,0	60	37	171
II	342	188	55,0	44,9	58	71	108
kiszonka ślázowca							
I	506	263	52,0	47,9	70	20	470
II	519	269	51,9	48,0	60	26	303
kiszonka miskanta							
I	409	217	53,1	46,8	47	52	441
II	452	241	53,3	46,6	62	49	399
sianokiszonka							
I	402	207	51,6	48,3	60	37	72
II	448	237	53,0	46,9	59	43	88

*objętość gazu w warunkach normalnych, w odniesieniu do suchej masy organicznej osadu

do danych eksperymentalnych przyjęto współczynnik zgodności (ϕ^2), który jest stosunkiem sumy kwadratów odchyłek wartości obliczonych od wartości eksperymentalnych do sumy kwadratów odchyłek wartości eksperymentalnych od wartości średniej.

Do analizy statystycznej uzyskanych wyników zastosowano pakiet Statistica 10.0PL. Weryfikację hipotezy o normalności rozkładu każdej badanej zmiennej dokonano testem Shapiro-Wilka. Istotność różnic między zmiennymi określono z zastosowaniem jednoczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). Sprawdzenia jednorodności wariancji w grupach dokonano z wykorzystaniem testu Levene'a, zaś w celu określenia istotności różnic między analizowanymi zmiennymi test Tukeya. W testach przyjęto poziom istotności $\alpha=0,05$.

Wyniki badań

Charakterystyka surowca fermentacyjnego i pozostałości po fermentacji

Wszystkie analizowane surowce fermentacyjne (kiszonki substratów roślinnych wraz z inokulum) charakteryzowały się podobną zawartością węgla ogólnego (412÷435 mgC/g) oraz ogólnego węgla organicznego (344÷389 mgC/g) (tab. 2).

Wartości ChZT przesącza mieściły się w wąskim przedziale od 13,42 gO₂/dm³ – przypadku pozostałości po fermentacji sianokiszonki, do 14,03 gO₂/dm³ – w przypadku kiszonki lucerny. Wyniki analiz pozostałości po fermentacji wskazują, że proces beztlenowego rozkładu spowodował zmniejszenie zawartości związków organicznych w przesącze w wszystkich seriach badawczych. Najmniejszą zawartość ogólnego węgla organicznego wynoszącą 166 mgC/g i 171 mgC/g zanotowano odpowiednio w pozostałości po fermentacji kiszonki miskanta olbrzymiego i kiszonki kukurydzy, gdy reaktory były ogrzewane

mikrofalami. Podobnie w przypadku przesącza pozostałości po fermentacji kiszonki miskanta zanotowano najmniejszą wartość ChZT wynoszącą 7,73 gO₂/dm³. Zastosowanie mikrofal do ogrzewania reaktorów wpływało na charakterystykę pozostałości po fermentacji, którą poddano analizie po 40 d przetrzymania w układzie technologicznym. Podczas prac badawczych stwierdzono mniejszą zawartość węgla ogólnego i organicznego oraz mniejszą wartość ChZT w przesącze pozostałości po fermentacji kiszonki kukurydzy, sianokiszonki i kiszonki miskanta ($p<0,05$) (tab. 2). Rodzaj zastosowanego ogrzewania komór reakcji nie miał natomiast wpływu na charakterystykę pozostałości po fermentacji kiszonki ślázowca i lucerny ($p>0,05$).

Wydajność wytwarzania i skład biogazu

W badaniach porównano wydajność procesu wytwarzania biogazu z pięciu substratów roślinnych w procesie fermentacji metanowej w reaktorach respirometrycznych ogrzewanych w sposób konwencjonalny (etap I) oraz z udziałem mikrofal (etap II). Stosując ogrzewanie konwencjonalne, największą wydajność wytwarzania biogazu uzyskano podczas fermentacji kiszonki kukurydzy i kiszonki ślázowca (tab. 3). Średnia ilość biogazu powstającego z kiszonki kukurydzy w reaktorach ogrzewanych w sposób konwencjonalny wynosiła (w warunkach normalnych) 680 dm³/kg (w odniesieniu do suchej masy organicznej osadu), natomiast z kiszonki ślázowca 506 dm³/kg ($p<0,05$) (tab. 3). Nie stwierdzono istotnych różnic w wydajności wytwarzania biogazu z kiszonki miskanta olbrzymiego i sianokiszonki ($p>0,05$). Najmniejszą ilość biogazu na poziomie 331 dm³/kg zanotowano podczas fermentacji metanowej kiszonki lucerny (tab. 3). Największą zawartość metanu w wytworzonym gazie fermentacyjnym uzyskano podczas fermentacji kiszonki lucerny (54,9%), a najmniejszą w wyniku biogazowania sianokiszonki (51,6%). Biorąc pod uwagę wydajność wytwarzania biogazu oraz zawartość

Tabela 4. Kinetyka reakcji wytwarzania biogazu z roślin energetycznych w reaktorach ogrzewanych konwencjonalnie (etap I) i mikrofalami (etap II)
 Table 4. The reaction kinetics of biogas production from energy crops in conventionally heated (step I) and microwave-heated (step II) reactors

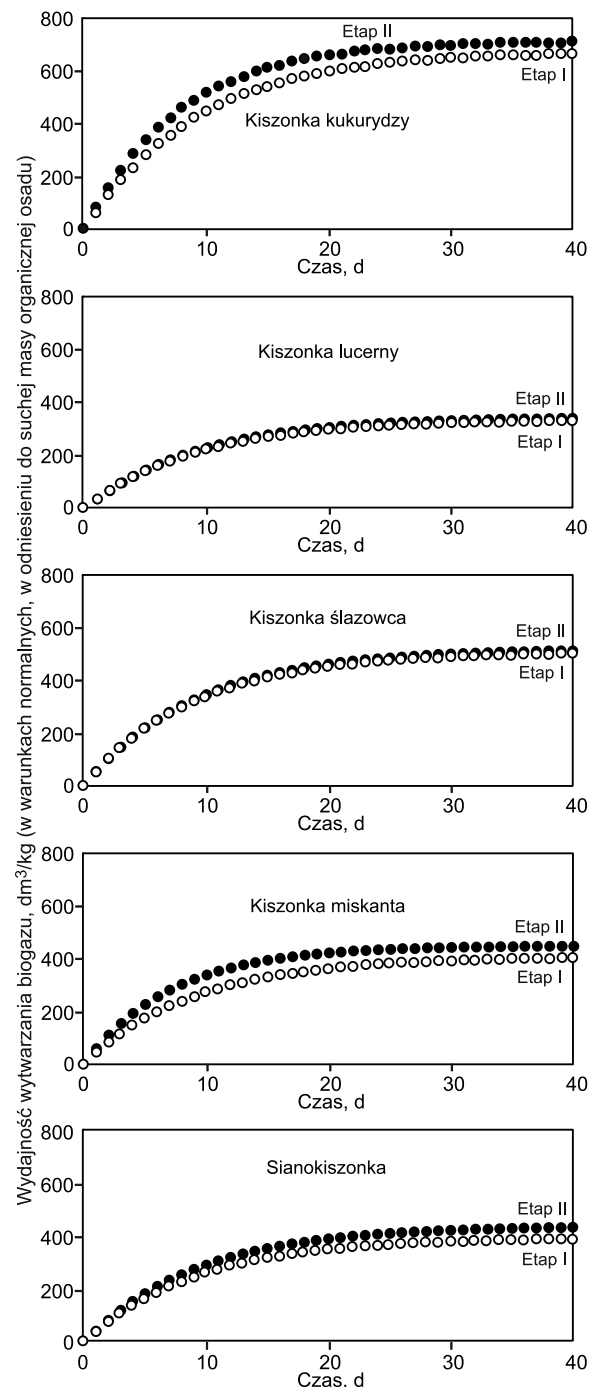
Etap badań	Kinetyka reakcji	Substrat roślinny				
		kiszonka kukurydzy	kiszonka lucerny	kiszonka ślázowca	kiszonka miskanta	sianokiszonka
I	k, 1/d	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	r, dm ³ /(kg·d)	74,8	36,3	55,6	45,0	44,2
II	k, 1/d	0,13	0,11	0,11	0,14	0,11
	r, dm ³ /(kg·d)	93,6	37,4	56,3	63,0	49,3

k – stała szybkości reakcji wytwarzania biogazu

r – szybkość reakcji wytwarzania biogazu (objętość biogazu w warunkach normalnych, w odniesieniu do suchej masy organicznej osadu)

w nim metanu stwierdzono, że wydajność wytwarzania metanu w etapie I była największa podczas fermentacji kiszonki kukurydzy (361 dm³/kg), a najmniejsza, gdy surowcem fermentacyjnym była kiszonka lucerny (181 dm³/kg) (tab. 3). Nie stwierdzono istotnych różnic w wydajności wytwarzania metanu podczas fermentacji kiszonki miskanta i sianokiszonki ($p > 0,05$). Szybkość reakcji wytwarzania biogazu była największa podczas fermentacji kiszonki kukurydzy oraz kiszonki ślázowca pensylwańskiego, najmniejsza zaś podczas biogazowania kiszonki lucerny. Wartość stałej szybkości reakcji wytwarzania biogazu w przypadku wszystkich substratów fermentacyjnych była taka sama (tab. 4).

Obserwowano pozytywny wpływ promieniowania mikrofalowego na wzrost wydajności wytwarzania biogazu w seriach badawczych wykorzystujących kiszonkę kukurydzy, sianokiszonkę oraz kiszonkę miskanta ($p < 0,05$). Stosując promieniowanie mikrofalowe do regulowania warunków termicznych w reaktorach wytwarzających biogaz z kiszonki kukurydzy zanotowano wydajność procesu około 720 dm³/kg, czyli o 5,8% większą w stosunku do wartości uzyskanej w etapie I ($p < 0,05$). Z kolei wytwarzanie biogazu na jednostkę suchej masy organicznej zawartej w kiszonce miskanta olbrzymiego w reaktorach ogrzewanych mikrofalami (etap II) była o 10,52% większa od zanotowanej w etapie I i wynosiła 452 dm³/kg (tab. 3). Największy wzrost skuteczności wytwarzania biogazu (o 11,4% – 448 dm³/kg) uzyskano podczas biogazowania sianokiszonki. Zanotowano o 6,1% większą zawartość metanu w biogazie powstającym z kiszonki kukurydzy podczas fermentacji metanowej w reaktorach ogrzewanych mikrofalami w stosunku do wartości uzyskanej w reaktorach z ogrzewaniem konwencjonalnym ($p < 0,05$). W pozostałych seriach badawczych różnice w ilości metanu w biogazie były nieistotne statystycznie ($p > 0,05$). Zaobserwowano jednak istotny ($p < 0,05$) wzrost ilości metanu w reaktorach ogrzewanych mikrofalami, w których substratem była kiszonka kukurydzy (wzrost o 18% w stosunku do etapu I), sianokiszonka (wzrost o 14,4%) oraz kiszonka miskanta (wzrost o 10,8%). Szybkość reakcji wytwarzania biogazu z kiszonki kukurydzy, sianokiszonki i kiszonki miskanta była większa niż w etapie I (tab. 4). Największą wydajność wytwarzania metanu w etapie II (426 dm³/kg) uzyskano z kiszonki kukurydzy, zaś najmniejszą (188 dm³/kg), gdy substratem fermentacyjnym była kiszonka lucerny. Porównywalną wydajność wytwarzania metanu zanotowano podczas fermentacji kiszonki ślázowca pensylwańskiego, sianokiszonki oraz kiszonki miskanta olbrzymiego (tab. 3). Przebieg procesu fermentacji metanowej testowanych rodzajów biomasy, w zależności od sposobu ogrzewania komór reaktora, zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Porównanie wydajności wytwarzania biogazu z roślin energetycznych w reaktorach respirometrycznych
 Fig. 1. Comparison of biogas production efficiency from energy crops in respirometric reactors

Dyskusja

W przeprowadzonych doświadczeniach zbadano wydajność wytwarzania biogazu i metanu z wybranych roślin energetycznych, w tym kiszonki kukurydzy, która jest najczęściej wykorzystywanym surowcem w biogazowniach rolniczych. W celu podniesienia wydajności wytwarzania biogazu zastosowano innowacyjną metodę ogrzewania reaktorów fermentacyjnych za pomocą mikrofal.

Stosując ogrzewanie konwencjonalne, największą wydajność wytwarzania biogazu wynoszącą 680,94 dm³/kg zanotowano podczas fermentacji kiszonki kukurydzy, a sam biogaz zawierał 53,1% metanu, co przekładało się na wydajność wytwarzania biometanu równą 361,24 dm³/kg. Tak dużą wydajność uzyskano jedynie podczas biogazowania kiszonki ślazuca pensylwańskiego (263,20 dm³/kg). W przypadku pozostałych roślin energetycznych analizowana skuteczność wytwarzania biometanu była o ponad 40% mniejsza od wartości uzyskanej podczas fermentacji kiszonki kukurydzy. Dane literaturowe wskazują, że ślazuca pensylwański stanowi obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych roślin energetycznych stosowanych do wytwarzania biogazu [2, 12, 13]. Cechuje się małymi wymaganiami względem warunków glebowych i może rosnąć nawet na glebach piaszczystych lub skalistych [14]. Wydajność upraw biomasy ślazuca (10÷25 t/ha) jest porównywalna z wydajnością upraw kukurydzy [12, 15], a badania biogazowania wskazują na jej olbrzymi potencjał metanogenny na poziomie ponad 400 dm³/kg [1, 15, 16] co potwierdzają również omawiane doświadczenia.

Zastosowanie promieniowania mikrofalowego do kształtowania warunków termicznych w komorach reakcji reaktorów beztlenowych poprawiło wydajność wytwarzania metanu z kiszonki kukurydzy, sianokiszonki i kiszonki miskanta olbrzymiego, natomiast nie miało wpływu na ilość metanu uzyskaną podczas fermentacji kiszonki lucerny oraz kiszonki ślazuca pensylwańskiego. Najwyższy wzrost wydajności wytwarzania biogazu (o 11,4%) zanotowano podczas biogazowania sianokiszonki. Z kolei największy wzrost zawartości metanu w biogazie (o 6,1%) uzyskano w procesie fermentacji kiszonki kukurydzy, co przełożyło się na większą skuteczność wytwarzania biometanu o 18% w stosunku do wartości uzyskanej w etapie badań z ogrzewaniem konwencjonalnym.

Zaletami technologii ogrzewania opartych na promieniowaniu mikrofalowym są wysoka skuteczność ogrzewania, selektywne i jednolite działanie oraz możliwość natychmiastowego rozpoczęcia i zakończenia procesu. Podstawowe znaczenie w podnoszeniu temperatury ma drganie cząsteczek dipoli i w mniejszym stopniu migracja jonów (dotyczy tylko roztworów) [17]. Energia mikrofal jest rozpraszana w postaci ciepła z oporu wewnętrznego rotacji. Oznacza to, że poruszające się cząsteczki dipoli w wyniku tarcia rozpraszają w postaci ciepła energię, którą otrzymały od mikrofal, co powoduje podniesienie temperatury. Jednak w przypadku układów biologicznych obserwowane są efekty, które wskazują na inne niż tylko termiczne oddziaływanie mikrofal [18]. Energia mikrofal powoduje rozerwanie wiązań polarnych i przyspieszenie procesów chemicznych i fizycznych, może z łatwością przeniknąć do wnętrza cząstek, powodując przyspieszenie jonów i zderzenia z innymi cząsteczkami. W literaturze odnotowano wiele atermicznych skutków oddziaływania promieniowania mikrofalowego, takich jak zmiany w strukturze i funkcji błon biologicznych [19] czy wpływ mikrofal na

transport błon komórkowych [8]. Pole elektromagnetyczne może także indukować zmiany w błonach komórkowych bezpośrednio lub pośrednio wpływając na właściwości receptorów wiążących ligandy (na przykład Ca²⁺), neuroprzekazniki lub hormony [20]. Zaobserwowano również wpływ mikrofal na aktywność enzymatyczną kultur *in vitro* [17]. Autorzy pracy [21] wykazali, że szybkość reakcji enzymatycznej ogrzewanej mikrofalami wzrastała maksymalnie 2÷3-krotnie w porównaniu do efektów uzyskanych w układzie z ogrzewaniem konwencjonalnym.

Obserwowano wpływ promieniowania mikrofalowego na organizmy żywe związany z absorpcją promieniowania mikrofalowego przez DNA [22], lecz dokładny mechanizm zakłócania działania DNA przez mikrofały nie jest jeszcze poznany. Oddziaływanie promieniowania mikrofalowego z cząsteczkami DNA i białek nie powoduje żadnych zmian w ich strukturze, ale w pewnych warunkach może wpływać na wiązania chemiczne [23]. Eksperymenty prowadzone przez autorów pracy [24] wykazały, że ekspozycja komórek *E. coli* na promieniowanie mikrofalowe w subletalnych warunkach temperatury powoduje, że błona komórkowa ulega odwracalnej indukcji o charakterze elektrokinetycznym bez efektów bakteriobójczych. W badaniach opisanych w pracy [11] nad wpływem promieniowania mikrofalowego na aktywność błony biologicznej w reaktorach z unieruchomioną biomasa stwierdzono znaczny wzrost aktywności mikroorganizmów poddawanych działaniu tego czynnika. Szczególnie w przypadku aktywności nityfikacyjnej w identycznych warunkach technologicznych uzyskano znaczący wzrost sprawności procesu. Natura atermicznych oddziaływań mikrofal nie została jeszcze jednoznacznie wyjaśniona [9]. Przeprowadzone badania wskazują jednak na możliwość intensyfikowania procesów biochemicznych w reaktorach beztlenowych, co prowadzi do wzrostu ilości biogazu i metanu otrzymywanych z roślin energetycznych.

Wnioski

◆ Największą wydajnością procesu wytwarzania biogazu podczas fermentacji metanowej, spośród badanych gatunków roślin energetycznych, charakteryzowały się kiszonka kukurydzy (680 dm³/kg) oraz kiszonka ślazuca pensylwańskiego (506 dm³/kg), natomiast najmniejszą ilość biogazu (331 dm³/kg) uzyskano podczas fermentacji kiszonki lucerny.

◆ Promieniowanie mikrofalowe, zastosowane do ogrzewania reaktorów beztlenowych, poprawiło wydajność wytwarzania metanu z kiszonki kukurydzy, sianokiszonki oraz kiszonki miskanta maksymalnie o 18% (wydajność wytwarzania metanu z kiszonki kukurydzy wzrosła z 361 dm³/kg do 426 dm³/kg), natomiast w przypadku kiszonki lucerny i ślazuca pensylwańskiego nie zaobserwowano wpływu promieniowania mikrofalowego na wydajność wytwarzania biogazu i metanu.

Badania realizowane w ramach projektu pt.: „Potencjał paszowy, energetyczny i ekonomiczny upraw ślazuca pensylwańskiego na glebach lekkich, odlogowanych i rekultywowanych” zostały sfinansowane przez NCBR w ramach programu Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo” – BIOSTRATEG (umowa nr 1/270745/2/NCBR/2015) oraz projektu pt.: „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii” – projekt kluczowy nr POIG.01.01.02-00-016/08.

LITERATURA

1. N. D. JABLONOWSKI, T. KOLLMANN, M. NABEL, T. DAMM, H. KLOSE, M. MÜLLER, M. BLÄSING, S. SEEBOLD, S. KRAFFT, I. KUPERJANS, M. DAHMEN, U. SCHURR: Valorization of *Sida* (*Sida hermaphrodita*) biomass for multiple energy purposes. *GCB Bioenergy* 2017, Vol. 9, pp. 202–214.
2. M. NABEL, V. M. TEMPERTON, H. POORTER, A. LÜCKE, N. D. JABLONOWSKI: Energizing marginal soils – the establishment of the energy crop *Sida hermaphrodita* as dependent on digestate fertilization, NPK, and legume intercropping. *Biomass and Bioenergy* 2016, Vol. 87, pp. 9–16.
3. A. KACPRZAK, K. MICHALSKA, Z. ROMANOWSKA-DUDA, M. GRZESIK: Rośliny energetyczne jako cenny surowiec do produkcji biogazu. *Kosmos – Problemy Nauk Biologicznych* 2012, vol. 61, nr 2, ss. 281–293.
4. M. E. MONTINGELLI, S. TEDESCO, A. G. OLABI: Biogas production from algal biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review* 2015, Vol. 43, pp. 961–972.
5. G. MARKOU, M. BRULE, A. BALAFOUTIS, M. KORNAROS, D. GEORGAKAKIS, G. PAPADAKIS: Biogas production from energy crops in northern Greece: Economics of electricity generation associated with heat recovery in a greenhouse. *Clean Technologies and Environmental Policy* 2017, Vol. 19, pp. 1147–1167.
6. C. GISSÉN, T. PRADE, E. KREUGER, I. A. NGES, H. ROSENQVIST, S. E. SVENSSON, M. LANTZ, J. E. MATTSSON, P. BÖRJESSON, L. BJÖRNSSON: Comparing energy crops for biogas production – yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilization. *Biomass and Bioenergy* 2014, Vol. 64, pp. 199–210.
7. I. DUER, M. FOTYMA, A. MADEJ [red.]: Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2004.
8. S. BANIK, S. BANDYOPADHYAYA, S. GANGULY, D. DAN: Effect of microwave irradiated *Methanosarcina barkeri* DSM-804 on biomethanation. *Bioresource Technology* 2006, Vol. 97, pp. 819–823.
9. C. ROUGIER, A. PROROT, P. CHAZAL, P. LEVEQUE, P. LEPRAT: Thermal and nonthermal effects of discontinuous microwave exposure (2.45 gigahertz) on the cell membrane of *Escherichia coli*. *Applied Environmental Microbiology* 2014, Vol. 80, No. 16, pp. 4832–4841.
10. M. ZIELIŃSKA, A. CYDZIK-KWIATKOWSKA, M. ZIELIŃSKI, M. DĘBOWSKI: Impact of temperature, microwave radiation and organic loading rate on methanogenic community and biogas production during fermentation of dairy wastewater. *Bioresource Technology* 2013, Vol. 129, pp. 308–314.
11. M. ZIELIŃSKI, S. CIESIELSKI, A. CYDZIK-KWIATKOWSKA, J. TUREK, M. DĘBOWSKI: Influence of microwave radiation on bacterial community structure in biofilm. *Process Biochemistry* 2007, Vol. 42, pp. 1250–1253.
12. H. BORKOWSKA, R. MOLAS: Yield comparison of four lignocellulosic perennial energy crop species. *Biomass Bioenergy* 2013, Vol. 51, pp. 145–153.
13. H. BORKOWSKA, R. MOLAS: Two extremely different crops, *Salix* and *Sida*, as sources of renewable bioenergy. *Biomass Bioenergy* 2012, Vol. 36, pp. 234–240.
14. H. BORKOWSKA, K. WARDZIŃSKA: Some effects of *Sida hermaphrodita* R. cultivation on sewage sludge. *Polish Journal of Environmental Studies* 2003, Vol. 12, pp. 119–122.
15. M. OLESZEK, M. MATYKA, J. LALAK, J. TYS, E. PĄPROTA: Characterization of *Sida hermaphrodita* as a feedstock for anaerobic digestion process. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 2013, Vol. 11, pp. 1839–1841.
16. T. POKÓJ, K. BULKOWSKA, Z. M. GUSIATIN, E. KLIMIUK, K. J. JANKOWSKI: Semi-continuous anaerobic digestion of different silage crops: VFAs formation, methane yield from fiber and non-fiber components and digestate composition. *Bioresource Technology* 2015, Vol. 190, pp. 201–210.
17. C. T. PONNE, P. BARTELS: Interaction of electromagnetic energy with biological material – relation to food processing. *Radiation, Physics and Chemistry* 1995, Vol. 45, No. 4, pp. 591–607.
18. B. MERTENES, D. KNORR: Developments of nonthermal processes for food preservation. *Food Technology* 1992, Vol. 5, pp. 125–133.
19. J. Y. JEON, H. Y. KIM: Microwave irradiation effect on diffusion of organic molecules in polymer. *European Polymer Journal* 2000, Vol. 36, pp. 895–899.
20. V. I. GELETYUK, V. N. KAZACHENKO, N. K. CHERMERIS, E. E. FASENKO: Dual effects of microwaves on single Ca²⁺-activated K⁺ in cultured kidney cells *Vero*. *FEBS Letters* 1995, Vol. 359, pp. 85–88.
21. M. C. PARKER, T. BESSON, S. LAMARE, M. D. LEGOY: Microwave radiation can increase the rate of enzyme catalyzed reaction in organic media. *Tetrahedron Letters* 1996, Vol. 37, No. 46, pp. 8383–8386.
22. Y. TAKASHIMA, H. HIROSE, S. KOYAMA, Y. SUZUKIY, M. TAKI, J. MIYAKOSHI: Effects of continuous and intermittent exposure to RF fields with a wide range of SARs on cell growth, survival, and cell cycle distribution. *Bioelectromagnetics* 2006, Vol. 27, pp. 392–400.
23. D. E. CLARK, D. C. FOLZ, J. K. WEST: Processing materials with microwave energy. *Materials Science and Engineering A* 2000, Vol. 287, pp. 153–158.
24. Y. SHAMIS, A. TAUBE, N. MITIK-DINEVA, R. CROFT, R. J. CRAWFORD, E. P. IVANOVA: Specific electromagnetic effects of microwave radiation on *Escherichia coli*. *Applied and Environmental Microbiology* 2011, Vol. 77, No. 9, pp. 3017–3022.

Zieliński, M., Dębowski, M., Kisielewska, M. Effectiveness of Biogas Production from Selected Energy Crops by Anaerobic Methane Digestion Supported by Microwave Radiation. *Ochrona Środowiska* 2018, Vol. 40, No. 4, pp. 43–48.

Abstract: The paper presents an innovative method of microwave heating applied to anaerobic reactors for the manufacture of biogas from the energy crops silages (maize (*Zea mays*), alfalfa (*Medicago* L.), sida (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), giant miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) and hay silage). Maize silage was demonstrated to be the most efficient in terms of biogas production, which amounted to 680 dm³/kg (per dry mass – VSS), while the least biogas (331 dm³/kg) was obtained during the fermentation of alfalfa silage. The microwave radiation clearly improved the capacity of maize, ray silage and

of giant miscanthus to produce methane. For the maize silage, the methane content in the biogas increased by 18% (process performance increased from 361 dm³/kg to 426 dm³/kg). In case of alfalfa and sida silage, no effect of microwave radiation on the increase in effectiveness of methane and biogas production by fermentation process was observed. Though the nature of athermal microwave effects has not yet been clearly explained, the research conducted implies a possibility to intensify biochemical processes in anaerobic reactors in order to improve the effectiveness of biogas and methane production from the energy crops.

Keywords: Methane fermentation, energy crops, maize silage, biomass, microwave radiation, athermal effects, biogas, methane.