

Wpływ składu jakościowego substratów oraz obciążenia komory ładunkiem związków organicznych na skład i ilość uzyskiwanego biogazu

*Marcin Dębowski, Marcin Zieliński, Mirosław Krzemieniowski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn*

1. Wstęp

Mimo intensywnego rozwoju technologii oraz metod postępowania z odpadami organicznymi podatnymi na biodegradację, wciąż poszukuje się rozwiązań umożliwiających ich opłacalną neutralizację. Korzystnym zarówno z punktu widzenia środowiska, jak również pozwalającym na wykorzystanie potencjału energetycznego tkwiącego w tego rodzaju substratach organicznych jest zastosowanie procesu fermentacji metanowej. Jest to sprawdzone rozwiązanie gwarantujące uzyskanie biogazu oraz produktu końcowego, który może być wykorzystany przyrodniczo [2, 4, 7, 10].

Energetyka odnawialna, w tym także technologie energetycznego przetworzenia substratów organicznych, wydają się być jednym ze sposobów na ograniczenie skali problemów związanych ze wzrostem cen i wyczerpywaniem zasobów konwencjonalnych źródeł energii. Wynikiem tych działań jest również istotny efekt ekologiczny, który dotyczy zmniejszenia emisji do atmosfery gazów i pyłów powstających podczas spalania paliw kopalnych [11, 3].

Istotny wzrost znaczenia beztlenowej utylizacji substratów organicznych, związany jest bezpośrednio z koniecznością zwiększenia udziału energii odnawialnej w stosunku do zużycia konwencjonalnych nośników energii. Założenia dokumentów Unii Europejskiej w sprawie odnawialnych źródeł energii określają wzrost jej udziału w krajach członkowskich do 12% w 2010 roku i 21% w roku 2020, oraz 5,75% udział biopaliw w zużyciu paliw silnikowych w transporcie. Rozpowszechnianie i rozwój energetyki odnawialnej jest zagwa-

rantowane w przyjętym przez rząd polski celu strategicznym – do 2010 roku udział OZE w całkowitym bilansie energii pierwotnej ma wzrosnąć do poziomu 7,5% oraz do 14,0% w roku 2020. Również dyrektywa Rady 99/31/WE, w sprawie składowisk odpadów, która weszła w życie 16.07.1999 r., zobowiązuje Polskę do zmniejszenia ilości składowanych odpadów komunalnych ulegających biodegradacji, w odniesieniu do ich masy wytworzonej w 1995 r., o 25% do roku 2010, 50% do roku 2013 oraz 65% do roku 2020.

Wykorzystanie na szeroką skalę fermentacji metanowej, jako sposobu na energetyczne wykorzystanie materii organicznej, związane jest bezpośrednio z opracowaniem skutecznych rozwiązań technologicznych warunkujących uzyskiwanie wydajnych efektów końcowych. Jednym z czynników wpływających i ograniczających sprawne prowadzenie procesu beztlenowego jest konieczność zapewnienia odpowiedniej temperatury stosowanego procesu [1, 9]. Równie istotnym z punktu widzenia efektywności pracy reaktorów beztlenowych jest skład substratu oraz obciążenie komory ładunkiem związków organicznych [5, 6, 8].

Celem opracowania było przeprowadzenie charakterystyki potencjalnych substratów stosowanych w procesie biogazowania (kiszonka kukurydzy, gnojowica świńska, odpady młyńskie) dostarczonych przez zakład branży spożywczej oraz ocena przebiegu procesu fermentacji metanowej przy zastosowaniu odmiennych parametrów jakościowych substratu oraz różnym obciążeniu komór ładunkiem związków organicznych.

2. Metodyka

Badania przeprowadzone zostały w laboratorium Katedry Inżynierii Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warmińsko – Mazurskiego w Olsztynie. W zależności od fazy doświadczenia i zakresu wykonywanych prac badawczych eksperyment podzielono na dwa etapy. W etapie pierwszym przeprowadzono analizę składu dostarczonych substratów procesu biogazowania, pod kątem uwodnienia i koncentracji materii organicznej. Część druga doświadczenia obejmowała przygotowanie mieszanek substratów organicznych w odpowiednich proporcjach oraz właściwą jednostopniową fermentację metanową prowadzoną z wykorzystaniem urządzeń pomiarowych umożliwiających określenie stopnia rozkładalności materii organicznej oraz monitoring ilości i składu powstającego biogazu.

2.1. Etap I - charakterystyka substratu wykorzystywanego w eksperymencie

Pierwsza część przeprowadzonych badań eksperymentalnych dotyczyła określenia charakterystyki, składu oraz parametrów technologicznych substratów, które mogą zostać potencjalnie zastosowane w procesie biogazowania.

Substraty zostały dostarczone przez służby zakładu zainteresowanego inwestycja w biogazownię rolniczą. W skład dostarczonych przez kontrahenta substratów organicznych wchodziły:

- kiszonka kukurydzy,
- gnojowica świńska,
- odpady młyńskie.

W tej części eksperymentu przeprowadzono również badania osadu beztlenowego pochodzącego z komory fermentacyjnej miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie. W trakcie badań analizowano parametry istotne z punktu widzenia prowadzenia procesu fermentacji metanowej, a mianowicie:

- sucha masa,
- zawartość substancji organicznych,
- zawartość substancji mineralnych,
- uwodnienie.

2.2. Etap II – badania respirometryczne zmierzające do oceny przebiegu fermentacji metanowej przy zakładanych parametrach technologicznych procesu

W tej części eksperymentu analizowano wpływ zmian jakościowego składu stosowanego substratu organicznego i obciążenia laboratoryjnych komór ładunkiem związków węglowych na ostateczne efekty technologiczne procesu fermentacji metanowej. Celem badań było określenie ilości i proporcji dostarczonych substratów organicznych, które zapewnią wysoką sprawność rozkładu związków organicznych, co bezpośrednio wpływa na uzyskanie dużej ilości biogazu o wysokiej koncentracji metanu.

W II etapie badań eksperyment podzielono na pięć serii doświadczalnych. Kryterium podziału stanowił odmienny skład mieszanki substratowej stosowanej w procesie przygotowania i właściwej fermentacji wsadu organicznego. W kolejnych seriach tej części eksperymentu zastosowano następujące kombinacje mieszanki substratowej:

- seria I – zastosowanie mieszanki substratowej, w której stonok wagowy kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynosił 1:1,
- seria II – zastosowanie mieszanki substratowej, w której stonok wagowy kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynosił 2:1,
- seria III – zastosowanie mieszanki substratowej, w której stonok wagowy kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynosił 3:1,
- seria IV – zastosowanie mieszanki substratowej, w której stonok wagowy kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynosił 4:1,

- seria V – osad fermentacyjny bez wprowadzania substratu organicznego.

We wszystkich seriach badawczych domieszka odpadów młynskich kształtowała się na poziomie 3,0% udziału w ogólnej masie stosowanego w procesie substratu.

Każda z zaprezentowanych powyżej serii eksperymentu została podzielona na trzy warianty technologiczne różniące się zastosowanym obciążeniem komory fermentacyjnej ładunkiem związków organicznych:

- wariant I – obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem związków organicznych na poziomie $2,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$,
- wariant II – obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem związków organicznych na poziomie $3,0 \text{ kg s. m. o./m}^3$,
- wariant III – obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem związków organicznych na poziomie $4,0 \text{ kg s. m. o./m}^3$.

Przed rozpoczęciem procesu właściwej fermentacji z wykorzystaniem układu respirometrów substraty zostały w odpowiedni sposób kondycjonowane i przygotowane. Skomponowane mieszanki substratowe zostały poddane procesowi 15 minutowej homogenizacji przy użyciu homogenizera typu MPW – 302 w celu odpowiedniego rozdrobnienia i wymieszania substratów organicznych.

Testowane substraty wprowadzono do urządzeń pomiarowych umożliwiających określenie stopnia rozkładalności materii organicznej oraz monitoring ilości i składu powstającego biogazu. W badaniach wykorzystano zestawy respirometryczne typu Oxi-Top Control firmy WTW, które składały się z komór reakcyjnych połączonych szczelnie z urządzeniami pomiarowo-rejestrującymi. Zastosowana metoda badawcza pozwala określić aktywność osadu beztlenowego, podatność stosowanych substratów organicznych na biodegradację oraz ilość i skład gazowych produktów metabolizmu. Urządzenia rejestrowały i analizowały zmiany ciśnienia parcjalego w komorze pomiarowej wywołanego produkcją biogazu w beztlenowych procesach prowadzonych przez mikroorganizmy. W każdym z prowadzonych wariantów eksperymentu do komór reakcyjnych wprowadzano 100 cm^3 osadu beztlenowego, a następnie dozowano założone ilości przygotowanego substratu organicznego.

Kompletny zestaw pomiarowy składający się z komory reakcyjnej oraz urządzenia pomiarowo-rejestrującego umieszczono w szafie termostatującej o histerezie nie przekraczającej $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Pomiary prowadzono w temperaturze mieszczącej 38°C . Czas pomiaru wynosił 20 d, wartości ciśnienia w komorze reakcyjnej były rejestrowane co 15 min. Przed końcem pomiaru, do specjalnego pojemnika we wnętrzu komory reakcyjnej, wprowadzono 30% zasadę sodową (NaOH). Pozwoliło to na wytrącenie z fazy gazowej ditlenku węgla (CO_2). Spa-

dek ciśnienia w komorze reakcyjnej odpowiadał zawartości ditlenku węgla, natomiast za pozostałą wysokość ciśnienia odpowiadała zawartość metanu. Zawartość reaktorów była mieszana z wykorzystaniem mieszadeł magnetycznych.

Podstawą obliczeń w badaniach respirometrycznych jest równanie gazu doskonałego:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (1)$$

gdzie:

- n – ilość moli gazu [mol],
- p – ciśnienie gazu [Pa],
- V – objętość gazu [m³],
- R – uniwersalna stała gazowa [8,314 J/mol · K],
- T – temperatura [K].

Zawartość węgla w fazie gazowej:

$$n_{CO_2} + n_{CH_4} = \frac{p_1 \cdot V_g}{R \cdot T} \cdot 10^{-4} \quad (2)$$

gdzie:

- n_{CO₂} + n_{CH₄} – ilość wytworzonych moli ditlenku węgla i metanu [mol],
- p₁ – różnica ciśnienia gazu w naczyniu badawczym na początku i na końcu doświadczenia, spowodowana zużyciem tlenu i absorpcja powstającego CO₂ [hPa],
- V_g – objętość fazy gazowej w komorze pomiarowej [ml],
- R – stała gazowa [8,314 J/mol · K],
- T – temperatura inkubacji [K],
- 10⁻⁴ – współczynnik przeliczeniowy Pa na hPa oraz m³ na cm³.

Zawartość ditlenku węgla w fazie gazowej:

$$n_{CO_2} = \left(\frac{p_1 \cdot V_g - p_2 \cdot (V_g - V_{KOH})}{R \cdot T} \right) \cdot 10^{-4} \quad (3)$$

gdzie:

- nCO₂ – ilość wytworzonych moli ditlenku węgla [mol],
- p₂ – różnica ciśnienia gazu w odpowiednim naczyniu badawczym na końcu doświadczenia minus ciśnienie na początku doświadczenia minus ciśnienie w próbce ślepej po dodaniu roztworu KOH [hPa],
- V_{KOH} – objętość roztworu KOH [ml].

Zawartość metanu w fazie gazowej:

$$n_{CH_4} = n_{CO_2+CH_4} - n_{CO_2} \quad (4)$$

Na podstawie badań respirometrycznych określono również szybkość procesu produkcji biogazu w zależności od rodzaju substratu organicznego i zastosowanego obciążenia komór ładunkiem związków organicznych. Dokonywane przez analizator w odstępach 15 minutowych pomiary ciśnienia we wnętrzu komory pozwoliły na określenie szybkości procesu. Stałe szybkości reakcji wyznaczono na podstawie uzyskanych danych eksperymentalnych metodą regresji nieliniowej stosując program Statistica 8.0 PL. Wykorzystano metodę iteracyjną, w której w każdym kroku iteracyjnym funkcję zastępuje się różniczką liniową względem wyznaczonych parametrów. Jako miarę dopasowania krzywej (przy wyznaczonych parametrach) do danych eksperymentalnych przyjęto współczynnik zgodności ϕ^2 . Współczynnik ten jest stosunkiem sumy kwadratów odchyłeń wartości obliczonych na podstawie wyznaczonej funkcji od wartości eksperymentalnych, do sumy kwadratów odchyłeń wartości eksperymentalnych od wartości średniej. Zgodność jest tym lepsza, im wartość współczynnika ϕ^2 niższa. Przyjmowano takie dopasowanie modelu do punktów doświadczalnych, przy którym współczynnik zgodności nie przekraczał 0,2.

3. Wyniki badań

3.1. Etap I - charakterystyka substratu wykorzystywanego w eksperymencie

Charakterystyka dostarczonych przez służby kontrahenta i wykorzystywanych w doświadczeniach surowej materii organicznej oraz osadu fermentacyjnego pochodzącego z miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie została zaprezentowana w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka stosowanych w doświadczeniu substratów organicznych oraz osadu fermentacyjnego

Table 1. Characteristic of organic substrate used in the experiment

Substrat	Parametr			
	Sucha masa [%]	Uwodnienie [%]	Zawartość substancji organicznych [% s. m.]	Zawartość substancji mineralnych [% s. m.]
Kiszonka kukurydzy	30,22	69,78	88,99	11,01
Gnojowica świńska	5,57	94,43	79,74	20,26
Odpady młyńskie	88,71	11,29	79,25	20,74
Osad fermentacyjny	5,21	94,79	47,32	62,68

3.2. Etap II – badania respirometryczne mierzące do oceny przebiegu procesu fermentacji przy zakładanych parametrach technologicznych

Ilości biogazu, zawartość metanu oraz tempo produkcji gazu fermentacyjnego w przeliczeniu na warunki normalne uzyskane w tej części eksperymentu zaprezentowano w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów respirometrycznych uzyskanych w II etapie badań.

Table 2. Results of respirometric measurements in II phase of the experiment.

Seria	Wariant	Parametr			
		produkcja biogazu [$m^3_N/T_{s.m.o.}$]	produkcja biogazu [m^3_N]	zawartość metanu [%]	szybkość [$m^3_N/T_{s.m.o.} \cdot h$]
I	2,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	517	103,4	64,9	3,077
	3,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	432	129,6	65,2	2,571
	4,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	356	142,4	63,4	2,250
II	2,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	523	104,6	65,4	3,113
	3,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	417	125,1	65,1	2,482
	4,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	359	143,6	63,8	2,137
III	2,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	491	98,2	62,3	2,923
	3,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	403	120,9	62,8	2,399
	4,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	341	136,4	63,1	2,030
IV	2,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	477	95,4	62,5	2,839
	3,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	394	118,2	61,8	2,345
	4,0 $kg_{s.m.o.}/m^3$	287	114,8	61,9	1,708
V	osad surowy	-	37,2	54,3	

Zastosowanie wyjściowej mieszanki substratowej w I serii eksperymentu pozwoliło na osiągnięcie produkcji biogazu na poziomie $517 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$ w wariancie, w którym zastosowane obciążenie modelowej komory beztlenowej ładunkiem związków organicznych wynosiło $2,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$. W tym wariancie technologicznym całkowita ilość uzyskanego biogazu po 7 dniach inkubacji wynosiła $103,4 \text{ m}^3_{\text{N}}$, a zawartość metanu kształtowała się na poziomie 64,9%. Wynikająca z obserwowanych przemian beztlenowych szybkość procesu wytwarzania biogazu wynosiła $3,077 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}} \cdot \text{h}$. Zwiększenie obciążenia laboratoryjnych reaktorów beztlenowych do poziomu $3,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$ skutkowało bezpośrednio spadkiem sprawności przetworzenia substratu organicznego w energetyczne produkty gazowe. Obserwowana wydajność produkcji biogazu w tym przypadku wynosiła $432 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$. Stwierdzono natomiast wyższą zawartość metanu w fazie gazowej, kształtującą się na poziomie 65,2%. Całkowita objętość gazu fermentacyjnego wynosiła natomiast $129,6 \text{ m}^3_{\text{N}}$.

Najniższe efekty końcowe w I serii doświadczenia tej części doświadczenia stwierdzono w przypadku, gdy stosowane obciążenie laboratoryjnych komór beztlenowych wynosiło $4,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$ żywnościowych. To rozwiązanie technologiczne umożliwiło uzyskanie wydajności wytwarzania biogazu na poziomie $356 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$ z szybkością reakcji wynoszącą $2,250 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}} \cdot \text{h}$. Stwierdzono, że zawartość metanu w fazie gazowej wynosiła 63,4%, a całkowita ilość uzyskanego biogazu oscylowała wokół wartości $142,4 \text{ m}^3_{\text{N}}$.

Porównywalne wydajności uzysku gazu fermentacyjnego stwierdzono w serii drugiej, w której zastosowano mieszankę substratową o stosunku wagowym kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynoszącym 2:1. Obciążenie reaktorów modelowych wynoszące $2,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$ pozwoliło na uzyskanie następujących parametrów charakteryzujących proces beztlenowy: wydajność produkcji biogazu – $523 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$, szybkość produkcji biogazu – $3,113 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}} \cdot \text{h}$, koncentracja metanu w fazie gazowej – 65,4%. W tej serii zastosowanie obciążenia objętości laboratoryjnych komór beztlenowych ładunkiem związków organicznych na poziomie $3,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$ bezpośrednio warunkowało uzyskanie produkcji biogazu w ilości $417 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$, o koncentracji metanu 65,1%. Całkowita objętość gazowych produktów bakteryjnych przemian beztlenowych w tym wariancie doświadczenia wyniosła $125,1 \text{ m}^3_{\text{N}}$, a zanotowana szybkość reakcji natomiast $2,484 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}} \cdot \text{h}$. Istotnie niższą wydajność ($359 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}}$) i szybkość ($2,137 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}_{\text{s.m.o.}} \cdot \text{h}$) produkcji biogazu stwierdzono, w przypadku gdy zwiększono obciążenie układ technologicznego do wartości $4,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3$. Zawartość metanu w gazie fermentacyjnym w tym przypadku wynosiła 63,8%, natomiast jego całkowita objętość $143,6 \text{ m}^3_{\text{N}}$.

Istotnie niższe ilości produkowanego biogazu oraz jego gorszą charakterystykę jakościową zanotowano natomiast w serii III, gdzie wagowy udział kiszonki kukurydzy do gnojowicy świńskiej wynoszącym 2:1. W tym rozwiązaniu technologicznym zastosowanie obciążenia objętości laboratoryjnych komór bez-

tlenowych ładunkiem związków organicznych na poziomie $2,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$ bezpośrednio warunkowało uzyskanie produkcji biogazu w ilości $491 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.}$, o koncentracji metanu $62,3\%$. Całkowita objętość gazowych produktów bakteryjnych przemian beztlenowych w tym wariantcie doświadczenia wyniosła $98,2 \text{ m}^3_{\text{N}}$, a zanotowana szybkość reakcji natomiast $2,923 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.} \cdot \text{h}$. Wariant II, w którym zastosowane obciążenie komory beztlenowej ładunkiem związków organicznych wynosiło $2,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$, pozwolił na osiągnięcie produkcji biogazu na poziomie $403 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.}$. W tej części doświadczenia całkowita ilość uzyskanego biogazu po 7 dniach inkubacji wynosiła $120,9 \text{ m}^3_{\text{N}}$, a zawartość metanu kształtowała się na poziomie $62,8\%$. Wynikająca z obserwowanych przemian beztlenowych szybkość procesu wytwarzania biogazu wynosiła $2,399 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.} \cdot \text{h}$. Zwiększenie obciążenia laboratoryjnych reaktorów beztlenowych do poziomu $4,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$ skutkowało bezpośrednio spadkiem sprawności przetworzenia substratu organicznego w energetyczne produkty gazowe. Obserwowana wydajność produkcji biogazu w tym przypadku wynosiła $341 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.}$ i była istotnie niższa niż w I i II wariantcie tej serii eksperymentu. Całkowita objętość gazu fermentacyjnego wynosiła natomiast $136,4 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}$.

W części eksperymentu, która dotyczyła oceny największego udziału kiszonki z kukurydzy w ogólnej masie substratu organicznego (seria IV) stwierdzono istotnie niższe końcowe efekty prowadzenia procesu fermentacji metanowej. Zastosowanie obciążenia laboratoryjnych komór beztlenowych na poziomie $2,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$ pozwoliło na uzyskanie $95,4 \text{ m}^3_{\text{N}}$ biogazu, a zawartość metanu kształtowała się na poziomie $62,5\%$. Wynikająca z obserwowanych przemian beztlenowych szybkość procesu wytwarzania biogazu wynosiła $2,839 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.} \cdot \text{h}$. Zwiększenie obciążenia laboratoryjnych reaktorów beztlenowych do poziomu $3,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$ skutkowało bezpośrednio spadkiem sprawności przetworzenia substratu organicznego w energetyczne produkty gazowe. Obserwowana wydajność produkcji biogazu w tym przypadku wynosiła $394 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.}$. Stwierdzono również istotnie niższą zawartość metanu w fazie gazowej, kształtująca się na poziomie $61,8\%$. Całkowita objętość gazu fermentacyjnego wynosiła natomiast $118,2 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T}$.

W wariantcie trzecim, w którym testowane obciążenie reaktorów modelowych wynosiło $4,0 \text{ kg s.m.o./m}^3$ końcowe efekty fermentacji metanowej wynosiły odpowiednio: wydajność produkcji biogazu – $287 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.}$, szybkość produkcji biogazu – $1,708 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{T s.m.o.} \cdot \text{h}$, koncentracja metanu – $61,9\%$.

Dodatkowo przeprowadzono badania respirometryczne przy wykorzystaniu jedynie osadu beztlenowego pochodzącego z komory fermentacyjnej miejskiej oczyszczalni ścieków w Olsztynie bez wprowadzania dodatkowego substratu organicznego. W tej próbie kontrolnej całkowita objętość biogazu kształtowała się na poziomie $37,2 \text{ m}^3_{\text{N}}$, przy zawartości metanu $54,3\%$.

4. Wnioski

Przeprowadzone prace badawcze pozwalają stwierdzić, iż zastosowanie mieszanki substratowej składającej się z kiszonki kukurydzy oraz gnojowicy świńskiej, z niewielkim udziałem poprodukcyjnych odpadów młynskich pozwoli na uzyskanie wydajnej produkcji biogazu o koncentracji metanu kształtującej się na poziomie powyżej 60%.

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów udowodniono, iż najwyższą intensywnością wytwarzania wysokoenergetycznego paliwa gazowego charakteryzowały się warianty technologiczne, w których wagowy stonk kiszonki kukurydzy do gnojowicy zawierał się w przedziale od 1 : 1 do 2 : 1. W tych seriach badawczych uzyskano najwyższą, całkowitą ilość wyprodukowanego biogazu oraz jego najlepszy skład jakościowy. Zwiększanie udziału kiszonki kukurydzy w ogólnej ilości substratu organicznego poddawanego procesowi fermentacji metanowej wpływał negatywnie na uzyskiwane ostateczne efekty technologiczne.

W analizowanym zakresie obciążeń laboratoryjnych komór beztlenowych ładunkiem związków organicznych najkorzystniejsze okazało się zastosowanie obciążenia reaktora na poziomie $2,0 \text{ kg}_{\text{s.m.o.}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ z uwagi największą jednostkową produkcję biogazu z jednostki masy przetwarzanego substratu. Oznacza to lepsze wykorzystanie dostępnego surowca i pełniejsze jego przetworzenie. Efektywność produkcji biogazu przypadająca na masę substratu organicznego wprowadzonego do komory spadała istotnie wraz ze zwiększaniem obciążenia.

Literatura

1. **Abring B.K., Ibrahim A.A.:** *Effect of temperature increase from 55 to 65°C on performance and microbial population dynamic of an anaerobic reactor treating cattle manure*, Water Research 35(10), 244-245, 2001.
2. **Baere L.:** *Anaerobic digestion of solid waste: state of the art*. Water Science Technology, 41 (3), 280-283, 1999.
3. **Buraczewski G.:** *Fermentacja metanowa*, PWN Warszawa, 1989.
4. **Egigian N.C.:** *Overview of anaerobic digestion technologies in Europe*, BioCycle, 45 (1), 156-167, 2004.
5. **Han S.K., Shin H.S., Song Y.C., Lee C.Y., Kim S.H.:** *Novel anaerobic process for the methane and compost from food waste*, Proceeding of the 9th World Congress on Anaerobic Digestion. Antwerpen. Belgium. Sep.2-6, 645-650, 2001.
6. **Hansen K.H., Angelidaki I., Ahring B. K.:** *Anaerobic digestion of swine manure inhibition by ammonia*, Water Research, 32, 5-12, 1998.
7. **Kotner M.:** *Biogas in agriculture and industry. Potential present use and perspectives*, Renewable Energy World, 44, 133-143, 2001.

8. **Oleszkiewicz J.A., Poggi-Valardo H.M.:** *High-solids anaerobic digestion of mixed municipal solid waste*, J. Env. Eng., 23 (11), 1087-1092, 1997
9. **Sekiguchi Y., Kamagata Y., Harada H.:** *Recent advances in methane fermentation technology*. Current Opinion in Biotechnology, 12, 277-282, 2001.
10. **Sharma V.K., Testa C., Castelluccio G.:** *Anaerobic treatment of semi-solid organic waste*. Energy Conversion & Management, 40, 369-384, 1999.
11. **Weiland P.:** *One-and two-step anaerobic digestion of Solid Agroindustrial Residues*. Water Science and Technology. 27(2); 145-151, 1993

The Effect of Substrate Qualitative Composition and Chamber Load of Organic Matter on Composition and Amount of Produced Biogas

Abstract

Despite the intense development of technology and methods of handling biodegradable organic waste, solutions are still being sought to enable its profitable neutralization. One such approach, which is both beneficial for the environment and makes use of the energetic potential of such organic substrates, is the application of methane fermentation. It is a solution which guarantees the production of biogas and a final product which may be naturally utilized.

The aim of the study was to characterize potential substrates used in the process of biogas production (corn silage, liquid pig manure, flour production waste), supplied by food production plants, and evaluation of the methane fermentation process with various technological variants.

The experiments were conducted under laboratory conditions. Depending on the experiment phase and the scope of the research work, the experiment was divided into two phases. The first included an analysis of the composition of the substrates for biogas production in terms of their hydration and concentration of organic matter. In the second part of the experiment, mixtures of organic substrates were prepared in appropriate proportions and a one-step methane fermentation was performed, employing measuring equipment which measured to what extent the organic matter is degradable and monitored the amount and composition of the produced biogas.

The experiment found that the application of a substrate mixture, consisting of corn silage, liquid pig manure, with a small proportion of flour production waste, allows for production of biogas containing more than 60% methane.

It was found that the highest intensity of high-energy fuel production is achieved in those technological variants in which the ratio of corn silage to liquid pig manure (w/w) ranges from 1:1 to 2:1. The highest amount of biogas and its best qualitative composition were achieved in those experimental series. Within the analyzed range of the laboratory anaerobic chamber loads with organic impurities, the application of a load of $2.0 \text{ kg}_{\text{d.o.m.}}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ proved the most profitable due to the highest biogas production per unit mass of the substrate.

