



Badania nad zastosowaniem wybranych makrofitów w procesie fermentacji metanowej

Artur Mielcarek, Mirosław Krzemieniewski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

1. Wstęp

W skali światowej obserwuje się wzrost zużycia energii. Jednocześnie wzrasta zapotrzebowanie na tzw. „czystą energię”. Poszukuje się coraz nowszych, bardziej wydajnych technologii i jej alternatywnych źródeł. Spośród odnawialnych źródeł energii wskazuje się na duży potencjał biomasy. Tego typu świeży substrat charakteryzuje się zazwyczaj znacznym uwodnieniem. Rozwiązaniem pozwalającym na efektywne wykorzystanie potencjału energetycznego takiego substratu jest proces fermentacji metanowej [9, 11]. W biogazowniach rolniczych wykorzystywane są zarówno rośliny pochodzące ze specjalnych upraw energetycznych takie jak kukurydza, buraki cukrowe, lucerna jak i odpady pochodzenia rolniczego i rolno-spożywczego. Dobór odpowiedniego surowca stanowi często kluczową część procesu w technologii fermentacji metanowej. Wybór powinien być podyktowany zarówno względami ekonomicznymi, do których zaliczymy dostępność oraz koszt pozyskania, jak i ekologicznymi, w tym redukcja emisji ditlenku węgla (CO_2) do atmosfery oraz zmniejszenie puli związków biogenych trafiających do środowiska, a zdeponowanych w biomacie roślinnej [3, 13, 18]. Zwiększony popyt na surowce wykorzystywane w biogazowniach stwarza ryzyko wzrostu cen płodów rolnych, a w konsekwencji decyduje o kosztach wyprodukowanej energii i o opłacalności tego typu przedsięwzięć. Gdy koszty pozyskania surowca ze specjalnych upraw energetycznych stają się zbyt wysokie lub możliwości lokalnego rynku rolniczego czy rolno-spożywczego są niewystarczające, należy poszukiwać alternatywnych źródeł, które zapewnią stabilną i wydajną produkcję biogazu [2, 13].

Celem opracowania była analiza możliwości zastosowania roślin makrofitowych takich jak: Trzcina pospolita (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), Pałka szerokolistna (*Typha latifolia* L.), Tatarak zwyczajny (*Acorus calamus* L.), Rogatek sztywny (*Ceratophyllum demersum* L. s. s.) jako potencjalnych substratów w procesie fermentacji metanowej z zastosowaniem różnych wariantów obciążenia komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych.

2. Ogólna charakterystyka roślin wykorzystanych w badaniach

W badaniach wykorzystano makrofity pospolicie występujące na terenie Polski. Szeroki zasięg geograficzny badanych roślin sprzyja łatwemu pozyskaniu i zastosowaniu ich w celach technologicznych. Charakteryzują się one specyficzną budową przystosowującą je do życia w warunkach ciągłego kontaktu zarówno z wodami powierzchniowymi jak i gruntowymi. Tkanka okrywająca jest cienka. Główny budulec stanowi tkanka powietrzna – aerenchyma, która tworzy system kanałów i przestrzeni umożliwiające rozprowadzanie powietrza w tym głównie tlenu do części roślin stale znajdujących się pod powierzchnią wody co zapewnia wydajny wzrost roślin. Wykorzystane rośliny występują w znacznej ilości w zbiornikach o podwyższonej żyzności a także w ich pobliżu. Środowiska te sprzyjają przyrostowi biomasy, która wykorzystana w celach energetycznych przyczynia się do zmniejszenia trofii danego zbiornika wodnego [7, 14]. Makrofity są surowcem naturalnie występującym w środowisku, co ogranicza nakłady finansowe związane z pozyskaniem, i transportem przed właściwym procesem fermentacji metanowej, w przeciwieństwie do specjalnych upraw energetycznych, gdzie koszty związane są również z uprawą i utrzymaniem plantacji. Makrofity są również materiałem odpadowym podczas konserwacji różnego rodzaju urządzeń melioracyjnych istotnych dla rolnictwa i gospodarki wodnej na terenie miast. Wykorzystywane są również w hydrofitowych systemach oczyszczania ścieków, gdzie nadmierna biomasa stanowi materiał odpadowy zawierający pierwiastki biogenne (azot i fosfor), a także metale ciężkie dostające się wraz z dopływającymi ściekami. Maksymalna zawartość azotu ogólnego zdeponowana w częściach nadziemnych makrofitów na obszarze 1 m² może wynosić 6600 mg dla trzciny pospolitej, 4400 mg dla pałki szerokolistnej, 3600 mg dla tataraku zwyczajnego.

Odpowiednio maksymalna zawartość fosforu całkowitego wynosi 300 mg/m², 800 mg/m² i 1000 mg/m² [11, 12]. Biomasę można pozyskiwać 2–3 razy w ciągu okresu wegetacyjnego [3].

Trzcina pospolita (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), jest gatunkiem szeroko rozpowszechnionym na całym świecie, o szerokiej skali tolerancji ekologicznej. W Polsce występuje na terenie całego kraju, tworzy często rozległe agregacje. Występuje w zbiornikach wodnych, nad ich brzegami, na podmokłych łąkach, przy rowach melioracyjnych, torfowiskach. Znosi zarówno falowanie wody, jak i podtapianie. Może rosnąć na różnych podłożach. Dorasta do 4 m wysokości, tworzy również rozległe podziemne kłącza [7, 17].

Pałka szerokolistna (*Typha latifolia* L.), jest również gatunkiem pospolicie występującym na terenie całej Polski. Preferuje zbiorniki wód stojących lub wolno płynących. Rośnie na żyznym podłożu. Osiąga wysokość 2,5 m, o średnicy łodygi ok. 2 cm. Tworzy silne, rozgałęzione kłącza, w których magazynuje skrobię [7, 17].

Tatarak zwyczajny (*Acorus calamus* L.), jest rośliną występującą na całym świecie, rośnie na zmineralizowanym podłożu. Dorasta do ponad 1 metra wysokości, tworzy rozległe grube do 3 cm kłącza. Porasta brzegi zbiorników wodnych, rowów melioracyjnych tworząc agregacje [7, 15].

Rogatek sztywny (*Ceratophyllum demersum* L. s. s.), należy do hydrofitów i nie wykształca typowych korzeni. Jest rośliną pospolicie występującą nie tylko w Polsce ale i na całym świecie. Występuje w żyznych zbiornikach, znosi nawet duże zacienienie, przez co wygrywa konkurencje z innymi roślinami w końcowych etapach eutrofizacji, często stanowiąc ostatnie ogniwo przed całkowitym zarośnięciem zbiornika. Dorasta do ponad metra długości [15, 17].

3. Metodyka

Badania zostały wykonane w Katedrze Inżynierii Środowiska, Wydziału Nauk o Środowisku Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Zostały one podzielone na trzy etapy w zależności od zakresu wykonywanych prac. Etap pierwszy obejmował pozyskanie oraz przygotowanie surowców do dalszych badań. Drugi etap obejmował analizę fizyko-chemiczną wybranych substratów pod kątem uwodnienia, zawartości suchej masy a także związków organicznych. Etap trzeci polegał na przygotowaniu w odpowiednich ilościach substratów oraz wła-

ściwą fermentację metanową, jednostopniową z wykorzystaniem urządzeń pomiarowych umożliwiających monitoring składu i ilości powstającego biogazu.

Pierwsza część eksperymentu polegała na pozyskaniu materiału roślinnego i przygotowaniu pod kątem wykorzystania w procesie fermentacji metanowej. Trzcina pospolita, pałka szerokolistna oraz rogatek sztywny zostały pozyskane z terenu Jeziora Kortowskiego, Jeziora Starodworskiego i Jeziora Długiego, natomiast tatarak zwyczajny z terenu Jeziora Długiego i Jeziora Starodworskiego. Wszystkie zbiorniki występują na terenie miasta Olsztyn w województwie warmińsko-mazurskim. Próbkę pobrane z różnych stanowisk, zostały zmieszane w tych samych proporcjach wagowych. W ten sposób pozyskane próbki stanowiły materiał wyjściowy do dalszych badań. Do badań wykorzystano pędy nadziemne w okresie wegetacji. Próbkę pobrano w miesiącu lipcu. Przed przystąpieniem do dalszych badań substraty poddano rozdrobieniu z zastosowaniem homogenizatora Blixer 3 o pojemności 3,7 dm³, prowadząc proces każdorazowo przez 15 minut.

W drugiej części eksperymentu przeprowadzono analizę parametrów istotnych z punktu widzenia wykorzystania substratów w procesie fermentacji metanowej, mianowicie:

- sucha masa, zgodnie z PN-EN 12880:2004 (metoda wagowa),
- uwodnienie, zgodnie z PN-EN 12880:2004 (metoda obliczeniowa),
- części organiczne (straty przy prażeniu suchej masy), zgodnie z PN-EN 12879:2004,
- części mineralne (pozostałość przy prażeniu), zgodnie z PN-EN 12879:2004.

Etap trzeci obejmował analizę procesu fermentacji badanych substratów z produkcją biogazu o wysokiej koncentracji metanu, a także wpływu obciążenia laboratoryjnych komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych na te parametry.

Etap ten podzielono na 4 serie w zależności od wykorzystanego substratu:

- I seria – trzcina pospolita,
- II seria – pałka szerokolistna,
- III seria – tatarak zwyczajny,
- IV seria – rogatek sztywny.

W każdej serii zastosowano trzy warianty różniące się obciążeniem komory reakcyjnej ładunkiem związków organicznych:

- I wariant – $1 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$,
- II wariant – $2 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$,
- III wariant – $3 \text{ kg s.m.o./m}^3 \cdot \text{d}$.

Dla każdego wariantu dokonano pięciokrotnego powtórzenia analizy ilości i jakości produkowanego biogazu.

Przed przystąpieniem do właściwego procesu do komór reakcyjnych w każdym wariantcie wprowadzono 25 cm^3 osadu beztlenowego pochodzącego z zamkniętych komór fermentacyjnych z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Olsztynie, a następnie dodano wcześniej przygotowane substraty, w ilości odpowiadającej założonemu obciążeniu komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych. W celu zapewnienia warunków beztlenowych, komory reakcyjne zostały przepłukane strumieniem czystego azotu przez okres 5 minut a następnie szczelnie połączone z urządzeniami umożliwiającymi monitoring ilości powstającego biogazu. Zastosowano zestawy reakcyjne typu Oxi-Top Control firmy WTW. Urządzenia rejestrowały zmiany ciśnienia parcjalego w komorze reakcyjnej co 80 minut spowodowane produkcją biogazu w wyniku zachodzącej z udziałem mikroorganizmów fermentacji metanowej.

Zestawy reakcyjne zostały umieszczone w szafie termostatującej o histerezie nie przekraczającej $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Proces prowadzono w temperaturze 36°C przez okres 20 dób. Trzy doby przed końcem badań, do specjalnych pojemników w komorach reakcyjnych wprowadzono 3 cm^3 30% roztworu zasady potasowej (KOH), w celu wytrącenia z fazy gazowej ditlenku węgla (CO_2). Spadek ciśnienia w komorze fermentacyjnej odpowiadał zawartości ditlenku węgla w mieszaninie gazowej, zaś pozostałą część stanowił głównie metan (CH_4). Równoległe z próbkami właściwymi prowadzono pomiar respirometryczny dla próbek kontrolnych, do których wprowadzono jedynie 25 cm^3 osadu beztlenowego z zamkniętych komór fermentacyjnych bez dodatkowego substratu.

3.1. Metody obliczeniowe

Podstawą obliczeń w badaniach respirometrycznych było równanie gazu doskonałego [5]:

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

gdzie:

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

- $n_{CO_2} + n_{CH_4}$ – ilość wytworzonych moli ditlenku węgla i metanu [mol],
- p_1 – różnica ciśnienia gazu w naczyniu badawczym na początku i na końcu doświadczenia [hPa],
- V_g – objętość fazy gazowej w komorze pomiarowej [cm³],
- 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:

n_{CO_2} – ilość wytworzonych moli ditlenku węgla [mol],

$p_2 = p_k - p_p - p_s$

gdzie:

p_k – ciśnienie gazu w odpowiednim naczyniu badawczym na końcu doświadczenia

p_p – ciśnienie gazu na początku doświadczenia

p_s – ciśnienie gazu w próbie kontrolnej po dodaniu roztworu KOH [hPa],

V_{KOH} – objętość roztworu KOH [ml].

Zawartość metanu w fazie gazowej:

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

4. Omówienie i dyskusja wyników badań

Charakterystyka gotowych substratów wykorzystanych w procesie fermentacji metanowej została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry substratów wykorzystanych w badaniach

Table 1. The parameters of substrates used in the study

Substrat	Parametr			
	Uwodnienie [%]	Sucha masa ogólna [mg/g ś.m.*]	Sucha masa organiczna [mg/g ś.m.]	Sucha masa mineralna [mg/g ś.m.]
Trzcina pospolita	63,5	364,82	306,21	58,60
Pałka szerokolistna	77,8	221,56	203,70	17,86
Tatarak zwyczajny	76,5	234,20	214,20	20,00
Rogatek sztywny	89,5	104,90	74,00	30,90

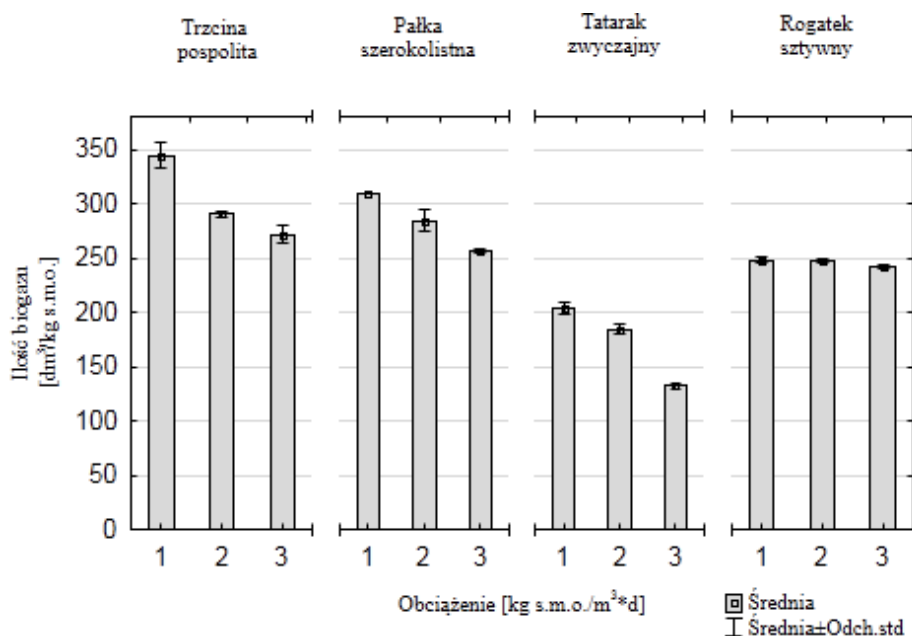
*g ś.m. – gram świeżej masy

Substraty wykorzystane w badaniach charakteryzowały się uwodnieniem w przedziale od 63,5% (trzcina pospolita) do 89,5% (rogatek sztywny). Uwodnienie substratu bezpośrednio związane było z zawartością suchej masy organicznej, która w pałce szerokolistnej i tataraku zwyczajnym była na podobnym poziomie (tabela 1).

Ilość biogazu otrzymanego podczas procesu fermentacji metanowej substratów w przeliczeniu na suchą masę organiczną przedstawiono na rys. 1.

Dla każdego substratu wydajność produkcji biogazu była najwyższa przy obciążeniu komory fermentacyjnej ładunkiem związków organicznych równym 1 kg s.m.o./m³·d. Wraz ze wzrostem ilości związków organicznych wprowadzanych do komory fermentacyjnej sprawność ich wykorzystania w procesie fermentacji metanowej wyraźnie spadała dla trzciny pospolitej, pałki szerokolistnej i tataraku zwyczajnego odpowiednio o 15,5%, 8,0% i 9,4% dla wariantu 2, oraz o 21,0%, 17,2%, 35,0% dla wariantu 3 w stosunku do wariantu 1. W serii IV, gdzie zastosowano

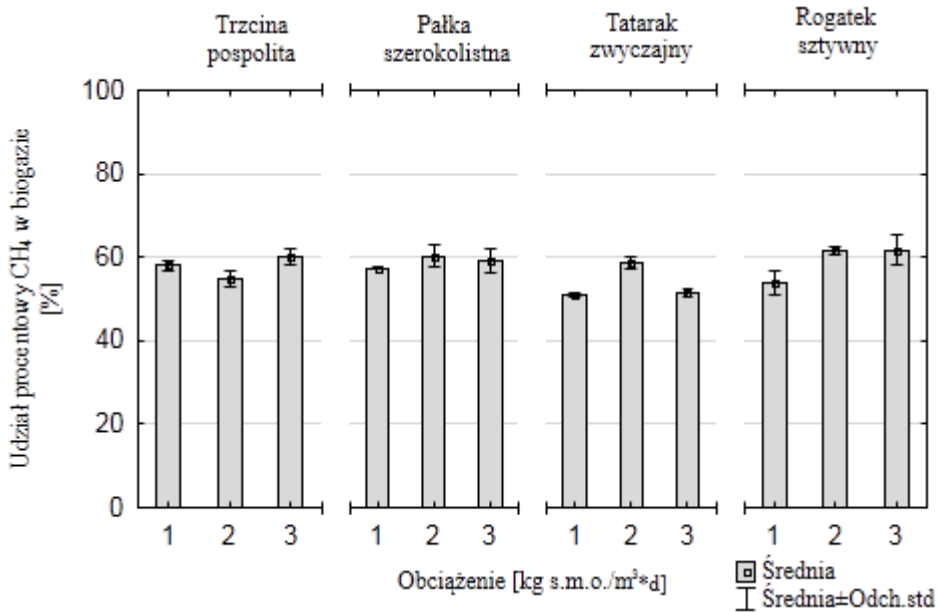
jako substrat rogatek sztywny nie zaobserwowanego tak wyraźnego wpływu obciążenia komory reakcyjnej na wykorzystanie substratu organicznego w produkcji biogazu. Zmniejszenie wydajności wykorzystania związków organicznych wyniosło 0,2% i 2,3% odpowiednio dla obciążenia 2 i 3 kg s.m.o./m³·d w stosunku do wariantu 1. Wydajność produkcji biogazu w tej serii wynosiła od 248 do 242 dm³/kg s.m.o. odpowiednio dla obciążenia 1 i 3 kg s.m.o./m³·d (rys.1).



Rys. 1. Produkcja biogazu w zależności od rodzaju substratu obciążenia komory fermentacyjnej

Fig.1. Biogas production depending on the applied variant

Najwyższą średnią wydajność produkcji biogazu uzyskano w serii I w wariantcie I, gdzie wyniosła ona 344 dm³/kg s.m.o. Najmniejszą ilość biogazu dla obciążenia 1 kg s.m.o./m³·d zanotowano w serii III i wyniosła ona 204 dm³/kg s.m.o.. W tej serii zanotowano również najniższą produkcję biogazu w całym okresie badań na poziomie 132 dm³/kg s.m.o., przy obciążeniu 3 kg s.m.o./m³·d. Przy tym obciążeniu komory ładunkiem związków organicznych, najwyższą wydajność produkcji biogazu uzyskano dla trzciny pospolitej (272 dm³/kg s.m.o.) (rys.1).



Rys. 2. Udział metanu w biogazie

Fig. 2. The percentage of methane in the biogas

Średni skład biogazu w przeprowadzonych badaniach dla obciążenia 1 kg s.m.o./m³·d zmieniał się w zakresie od 51,1% CH₄ dla tataraku zwyczajnego (najniższa średnia wartość zanotowana we wszystkich seriach i wariantach) do 58,1% CH₄ dla trzciny pospolitej. Dla obciążenia 2 kg s.m.o./m³·d ilość metanu w biogazie wynosiła od 55,0% dla trzciny pospolitej do 61,5% dla rogatka sztywnego. Przy obciążeniu 3 kg s.m.o./m³·d uzyskano ilość metanu w biogazie od 51,5% dla tataraku zwyczajnego do 61,7% dla rogatka sztywnego (najwyższa średnia wartość uzyskana w badaniach) (rys. 2).

Badania nad zastosowaniem różnych substratów pochodzenia rolniczego prowadzili m.in. Lehtomaki i in. (2006). Przeprowadzili badania wydajności produkcji biogazu dla obornika, liści buraków cukrowych, kiszonki z trawy i słomy owsianej. Spośród zastosowanych substratów najwyższą wydajnością wykorzystania substancji organicznych w przeliczeniu na ilość wytworzonego metanu w ciągu 20 dni pomiarowych charakteryzowała się kiszonka z trawy i obornik (odpowiednio 206 i 204 dm³/kg s.m.o.). Dla liści z buraków cukrowych i słomy owsianej

wartości te były niższe i wynosiły 181 i 138 dm³/kg s.m.o.. Autorzy wykazali ponadto spadek ilości uzyskiwanego metanu o 16–26% przy zwiększeniu obciążenia z 2 do 4 kg s.m.o./m³·d.

Dębowski i in. (2012) przeprowadzili badania dotyczące wydajności procesu fermentacji metanowej wykorzystując jako substrat makroglony. Uzyskali oni wydajność produkcji biogazu w zakresie od 327 do 276 m³/t s.m.o.. Ilość powstającego biogazu była uzależniona od obciążenia komory fermentacyjnej ładunkiem związków organicznych oraz czasem poboru próbek. Przy czym najwyższą wydajność zanotowano dla obciążenia 1 kg s.m.o./m³·d, a najniższą dla obciążenia 3 kg s.m.o./m³·d. Zawartość metanu zmieniała się w zakresie od 57–67%. Podobne efekty uzyskano w prezentowanych badaniach.

Seppälä i in. (2009) zbadali wydajność produkcji biogazu dla 4 rodzajów traw w tym dla mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinaceae* L.). Dla tego substratu uzyskali wydajność produkcji metanu na poziomie 296 dm³/kg s.m.o. przy 3-krotnie dłuższym okresie pomiarowym niż w prezentowanych badaniach. Stwierdzili ponadto, że dla próbek zebranych w czerwcu ilość powstałego biogazu była około 35% wyższa w porównaniu do próbek zebranych w sierpniu. Było to najprawdopodobniej spowodowane wyższą zawartością trudno rozkładalnych lignin w tkankach roślin pod koniec sierpnia. Badania te przeprowadzono bez jakiegokolwiek obróbki wstępnej substratu.

Grala i in. (2011) stosując wstępną obróbkę substratu przed procesem fermentacji, w postaci hydrotermalnej depolimeryzacji i enzymatycznej hydrolizy, uzyskali produkcje biogazu w zakresie od 0,021–0,054 dm³/g substratu. Stężenie metanu wynosiło 63,2–73,2%. Jako substrat wykorzystano glony pochodzące z Zalewu Wiślanego.

Hu i Yu (2006) przeprowadzili badania dotyczące podatności substratu pochodzącego z pałki szerokolistnej na rozkład w warunkach beztlenowych. Wykazali, że pałka szerokolistna może być wykorzystywana w procesie fermentacji. Uzyskali około 66% zmniejszenie zawartości związków organicznych w badanym substracie, nie dostarczyli jednak żadnych informacji o jakości i ilości powstającego biogazu.

W innych badaniach Moorhead i Nordstedt (1993) uzyskali wydajność produkcji biogazu od 200 do 280 dm³/kg s.m.o.. Jako substrat wykorzystali hiacynt wodny (*Eichhornia crassipes*).

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania w skali laboratoryjnej pozwalają stwierdzić, że istnieje potencjalna możliwość wykorzystania makrofitów w procesie fermentacji metanowej w celu uzyskania wydajnej produkcji biogazu.

W technologii produkcji biogazu ważne jest aby zastosowany substrat organiczny został w jak największym stopniu wykorzystany. W analizowanym układzie zaobserwowano najwyższą wydajność produkcji biogazu w przeliczeniu na suchą masę organiczną dla obciążenia modelowych komór fermentacyjnych ładunkiem związków organicznych na poziomie 1 kg s.m.o./m³·d. Dla tego wariantu wykorzystanie związków organicznych w procesie fermentacji metanowej było najwyższe. Wraz ze wzrostem ilości związków organicznych doprowadzanych do komór fermentacyjnych wydajność ta malała. Jedynie dla serii IV, wzrost obciążenia nie był związany z wyraźnym spadkiem wykorzystania związków organicznych. W takiej sytuacji istnieje możliwość zwiększenia ilości powstającego biogazu poprzez zwiększenie ilości doprowadzanego substratu, bez pogorszenia wydajności wykorzystania związków organicznych. Niezależnie od zastosowanego substratu i wariantu średni udział metanu w biogazie w przeprowadzonych badaniach wynosił od 51,1% do 61,7%.

Czynnikiem, który w największym stopniu wpływał na uzyskane efekty produkcji biogazu, był rodzaj zastosowanego substratu. Spośród zastosowanych roślin najwyższą jednostkową produkcję biogazu w wysokości 344 dm³/kg s.m.o. uzyskano dla trzciny pospolitej. Najniższą wydajność 132 dm³/kg s.m.o. produkcji biogazu zanotowano dla tataraku zwyczajnego, przy obciążeniu 3 kg s.m.o./m³·d.

Badania zostały zrealizowane w ramach Projektu Kluczowego nr POIG.01.01.02-00-016/08 pt.: „Modelowe kompleksy agroenergetyczne jako przykład kogeneracji rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii”.

Projekt finansowany w ramach PO Innowacyjna Gospodarka

Literatura

1. **Dębowski M., Grala A., Zieliński M., Dudek M.:** *Efficiency of the methane fermentation process of macroalgae biomass originating from pucker bay.* Archives of Environmental Protection. 38 (3), 1–9 (2012).
2. **Ericsson K., Nilsson L. J.:** *Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach.* Biomass & Bioenergy. 30, 1–15 (2006).
3. **Geber U.:** *Cutting frequency and stubble height of reed canary grass (*Phalaris arundinacea* L.): Influence on quality and quantity of biomass for biogas production.* Grass and Forage Science. 57 (4), 389–394 (2002).
4. **Grala A., Zieliński M., Dębowski M., Dudek M.:** *Effects of hydrothermal depolymerization and enzymatic hydrolysis of algae biomass on yield of methane fermentation process.* Polish Journal of Environmental Studies. 21 (2), 363–368 (2011).
5. **Heerenklage J., Stegmann R.:** *Analytical methods for the determination of the biological stability of waste samples.* Tenth International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari. Włochy, 3–7 październik 2005.
6. **Hu Z.-H., Yu H.-Q.:** *Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures.* Waste management. 26 (11), 1222–1228 (2006).
7. **Kłosowski S., Kłosowski G.:** *Rośliny wodne i bagienne.* Multico Oficyna Wydawnicza. Warszawa, 2006.
8. **Lehtomäki A., Huttunen S., Rintala J. A.:** *Laboratory investigations on co digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio.* Resource Conservation & Recycling. 51, 591–609 (2007).
9. **Mata-Alvarez J., Macé S., Llabrés P.:** *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.* Bioresource Technology. 74, 3–16 (2000).
10. **Moorhead K. & Nordstedt R.:** *Batch anaerobic digestion of wates hyacinth: effects of particle size, plant nitrogen content, and inoculum volume.* Bioresource Technology. 44, 71–76 (1993).
11. **Obarska-Pempkowiak H., Gajewska M., Wojciechowska E.:** *Hydrofitowe oczyszczanie wód i ścieków.* Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 2010.
12. **Ozimek T., Renman G.:** *Rola helofitów w oczyszczalniach hydrobotanicznych.* W: (Materiały) II Międzynarodowa Konferencja Nauk.-Techn., Akademia Rolnicza w Poznaniu.. Poznań, 109–118 (1996).

13. **Paska J., Salek M., Surma T.:** *Current status and perspectives of renewable energy sources in Poland.* Renewable & Sustainable Energy Reviews. 13, 142–154 (2009).
14. **Podbielkowski Z.:** *Słownik roślin użytkowych.* Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa, 2003.
15. **Podbielkowski Z.:** *Zarys hydrobotaniki.* Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa, 1996.
16. **Seppälä M., Paavola T., Lehtomäki A., Rintala J.:** *Biogas production from boreal herbaceous grasses – Specific methane yield and methane yield per hectare.* Bioresource Technology. 100 (12), 2952–295 (2009).
17. **Tomaszewicz H.:** *Roślinność wodna i szuwarowa Polski.* Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego. Warszawa, 1979.
18. **Ward A.J., Hobbs P.J., Holliman P.J., Jones D.L.:** *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources.* Bioresource Technology. 99 (17), 7928–7940 (2008).

Research on the Use of Selected Macrophytes in the Process of Methane Fermentation

Abstract

Energy consumption increases globally. Simultaneously demand for so called „clean energy“ escalates. Scientists are looking for new, more efficient technologies and alternative energy sources. Among the renewable energy sources a large potential of biomass is indicated.

The aim of this study was to analyze macrophytes such as *Phragmites australis*, *Typha latifolia*, *Acorus calamus*, *Ceratophyllum demersum* as potential substrates in the process of methane fermentation. Research presents the results of the quantity and quality of biogas production using different load variations of reaction chamber with organic compounds.

The study was divided into three stages depending on the range of the work. The first stage consisted of obtaining and preparation of raw materials for study. The second stage included physico-chemical analysis of substrates selected regarding hydration, dry matter content and organic compounds. The third stage was to prepare right quantities of substrates and conduct first stage fermentation, using measuring devices allowing to monitor the composition and quantity of the biogas. The experiments were conducted under laboratory conditions.

The study used plants collected from 3 lakes in Olsztyn. Investigations of biogas production were based on the respirometric method, using Oxitop Control – respirometric kit produced by WTW Company. This method allows to

determine the activity of anaerobic sludge as well as the susceptibility of organic substrates to biodegradability with the possibility to estimate the quantity and composition of gaseous products of metabolism. A single kit consisted of: a reaction tank with a volume of 0.5 L connected tightly with a measuring-recording device. The process was carried out by microorganisms under anaerobic conditions and the resulting biogas caused changes of partial pressure in the measuring chamber. Changes of pressure were monitored by the measuring equipment. Reaction kits were placed in a thermostatic cabinet with hysteresis not exceeding $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. The process was run at a temperature of 36°C . Reaction chamber was charged with three loads: 1 kg VSS/m³·d, 2 kg VSS/m³·d, 3 kg VSS/m³·d. The measurement was conducted in 5 replications for each variant of load applied in reaction chamber and each type of substrates,.

The highest yield of biogas production was obtained for 1 kg VSS/m³·d load, for each substrate used. With increasing charge of reaction chamber with load of organic compounds, the efficiency of biogas production decreased, except when the substrate was *Ceratophyllum demersum*. In this variant the resulting biogas quantity was constant, regardless of the applied load. The best substrate was the *Phragmites australis*. Average quantity of biogas in this variant was between 271 L/kg VSS to 344 L/kg VSS, depending on the applied load. The lowest yield of biogas production was observed for *Acorus calamus*. It oscillated from 132 L/kg VSS to 204 L/kg VSS depending on the applied load. The average percentage of methane in the biogas varied in the range of 51.1% to 61.7%, regardless of the applied load and substrate.