

Wytwarzanie biogazu z kiszonki *Sucrosorgo* 506

Mgr inż. Sebastian Andrzej Karolewski

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Intensywna eksploatacja nieodnawialnych źródeł energii: węgla kamiennego, węgla brunatnego, ropy naftowej i gazu ziemnego jest powodem sukcesywnego wyczerpywania się ich zasobów. Oprócz problemu braku odnawialności surowców

energetycznych, inne zagrożenia związane z energetyką konwencjonalną dotyczą ochrony środowiska. Za najważniejsze należy uznać dewastację terenów w wyniku budowy obiektów do wydobywania i przerobu surowców energetycznych, a także

skazanie środowiska produktami spalania. Z danych literaturowych wynika, że podczas spalania 1 mln ton węgla kamiennego średniej jakości powstaje około 20 tys. ton pyłów, 35 tys. ton dwutlenku siarki, 6 tys. ton tlenków azotu, a także 2 mln ton dwutlenku węgla oraz około 300 tys. ton popiołu, który w przypadku większości elektrowni jest składowany na składowiskach odpadów [7]. Czynione obecnie próby wdrażania czystych technologii węgla powodują znaczący wzrost kosztów i w konsekwencji ceny energii.

Z wymienionych powodów w ostatnich latach wzrasta zainteresowanie wykorzystaniem odnawialnych surowców, w tym energii słonecznej, energii wiatru, biogazu, pływów morskich, energii geotermalnej oraz biomasy roślin, jako niewyczerpalnego źródła płynnego paliwa.

BIOGAZ

Biogaz jest gazem powstałym w wyniku procesu fermentacji biomasy roślinnej i zwierzęcej. Surowcem do wytwarzania biogazu są ścieki, biodegradowalna frakcja odpadów komunalnych, odchody zwierzęce (np. gnojowica) [12], odpady przemysłu rolno-spożywczego, a także biomasa lignocelulozowa. Ponad to Halfter przeprowadził badania, które pozwoliły na opracowanie technologii pozyskiwania biogazu z odchodów zwierzęcych oraz ciekłego nawozu, do którego w celu eliminacji amoniaku dozowano CO_2 lub CaSO_4 [13]. Materiały lignocelulozowe stanowią: makulatura (papier, tektura), drewno i odpady drzewne (zrębki z szybko rosnących gatunków drzewiastych np.: wierby lub topoli), słoma i ziarna (zbóż, rzepaku), słoma upraw specjalnych roślin energetycznych z rodziny *Miscanthus*, *Sorghum*, *Topinambur* oraz szereg innych odpadów roślinnych powstających na etapach uprawy i pozyskiwania, jak też przetwarzania przemysłowego produktów (siana, ostatek kukurydzy, trzciny cukrowej i bagiennej, łusek oliwek, korzeni, pozostałości przerobu owoców). Obecnie, do produkcji biogazu najczęściej wykorzystuje się kukurydzą w formie kiszonki, ale rozważa się możliwość stosowania innych surowców, takich jak np. sorgo cukrowe, miskant cukrowy, miskant olbrzymi, trawy łąkowe, spartina preriowa, lucerna, burak półcukrowy (korzenie i liście), pszenica (ziarno i słoma). Holm i współpracownicy wytwarzali biogaz z wykorzystaniem roślin takich jak: trawa, lucerna, koniuczyna, rzepak, kukurydza, rzepa, kapusta, słonecznik, burak cukrowy, ziemniak, groch, fasola, soczewica, łubin oraz len [15]. W 2009 roku opatentowano technologię wytwarzania biogazu i nawozu z roślin hodowlanych o obniżonej zawartości lignin. Zastosowano w niej kiszonkę paszową, słomę, siano, koncentrat paszowy oraz inne części roślin pochodzące od brązowo-żółtych odmian sorga, prosa i kukurydzy [14].

Sorgo cukrowe, jako surowiec do produkcji biogazu, obok kiszonki kukurydzy zwyczajnej, cieszy się stosunkowo dużym zainteresowaniem.

Sorgo cukrowe jest rośliną z rodziny traw, która w zależności od odmiany i warunków uprawy, osiąga wysokość od 0,5 do 4 m. W naszych warunkach klimatycznych sorgo może być uprawiane z przeznaczeniem na cele paszowe, do produkcji siana i kiszonki. Jest ono spokrewnione z kukurydzą i dlatego może być wykorzystywane jako uprawa alternatywa, przy czym

gatunek ten dobrze rośnie w gorszych warunkach klimatycznych. Sorgo cukrowe toleruje stanowiska gleb lekkich, szybko nagrzewających się, natomiast jego uprawa nie jest wskazana na glebach ciężkich o trwale podmokłym gruncie. Roślina rozwija bardzo mocny system korzeniowy, który pozwala podczas długotrwałego niedoboru wody wejść w stan uśpienia. Gdy nastąpi zwiększenie dostępności wody w glebie, sorgo ponownie rozpoczyna wegetację. W trakcie tego okresu wartość minimalnych wymagań wilgotnościowych wynosi około 300 mm/m² opadów deszczu, przy czym optymalne warunki wilgotnościowe do wzrostu i rozwoju sorgo w okresie wegetacji zapewniają opady wynoszące około 500 ÷ 1000 mm/m². Spełnienie powyższych warunków pozwala na uzyskanie plonu około 60 ÷ 100 ton zielonej masy z hektara.

W okresie zbioru sorgo zawiera 20 ÷ 22% suchej masy, dając tym samym około 15 ÷ 20 ton suchej masy z hektara. W 1998 roku w przeprowadzonym w Rumunii eksperymencie wykazano, że sorgo może wydać większy plon, w granicach 114 ton zielonki/ha, co w przeliczeniu na suchą masę wynosi około 28 t/ha [10].

Wydajność sorgo jest większa w porównaniu z kukurydzą, która w sprzyjających warunkach klimatycznych jest w stanie wytworzyć plon w wysokości 50 t/ha zielonej masy. Zgromadzenie dużych zapasów wilgoci w bardzo żyznych glebach sprawia, że kukurydza dobrze zawiązuje kolby i rokuje bardzo dobre zbiory. Przy zachowaniu tak dobrych warunków rozwoju możliwe są zbiory po 60, a nawet 65 t/ha. W roku 2004 przeprowadzono badania porównawcze uprawy *Sucrosorgo 506* z kukurydzą, które były prowadzone przez IUNG w Puławach. Z przeprowadzonych badań wynika, że najwyższe plony zielonej masy wytwarza sorgo uprawiane w siewie czystym, dając około 81,8 t/ha. Natomiast kukurydza również w siewie czystym wytwarza około 65,6 t/ha zielonej masy.

Atutem uprawy sorgo cukrowego zamiast kukurydzy jest fakt, że zwierzęta leśne nie wyrządzają w niej szkód, gdyż w przeciwieństwie do zielonki z kukurydzy nie żywią się zielonką z sorgo. Na plantacjach kukurydzy zachodniej zlokalizowanych w południowej Polsce istnieje problem związany z obecnością kukurydzianej stonki korzeniowej, zniechęcając do jej upraw na rzecz sorgo.

Najlepsze właściwości ma sorgo, którego zbiór prowadzi się na przełomie września i października, ponieważ zawiera w pełni dojrzałe nasiona, które charakteryzują się bardzo wysoką zawartością energii, co przyczynia się do jej zwiększenia w przygotowanej kiszonce. Przeprowadzone w 1996 roku badania wykazały, że 1 tona suchej masy sorgo cukrowego stanowi ekwiwalent 0,4 tony ropy naftowej. Ma właściwości pozwalające zapewnić kotłowni stabilną i perspektywiczną pracę, gwarantując dynamiczny rozwój dostaw biomasy [4].

Sorgo cukrowe jest rośliną, która ma dużo więcej zalet w odniesieniu do innych roślin energetycznych, również kukurydzy, przede wszystkim: daje wysoki plon, jest mało wymagająca, a także bardzo łatwa i tania w uprawie (średnio koszty jej hodowli są niższe o 30% w stosunku do kukurydzy). Jest rośliną nie powodującą zakłóceń innych prac rolnych, gdyż późny siew i późny zbiór nie koliduje z pozostałymi pracami polowymi. Ponadto pozwala na przewidywalne i powtarzalne przyrosty w uprawie wieloletniej oraz łatwość zbioru i magazynowania.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy było opracowanie założeń przetwarzania na biogaz kiszonki *Sucrosorgo 506* (*Sorghum saccharatum*).

Do realizacji powyższego celu przewidziano następujący zakres badań:

- przeprowadzenie eksperymentu technologicznego w reaktorze laboratoryjnym, zakładając fermentację moką oraz hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego wynoszący 60 dni,
- charakterystykę jakości wody osadowej, a także wyznaczenie jednostkowej szybkości produkcji oraz współczynnika wydajności biogazu i metanu.

PRACE POLOWE

W badaniach jako surowiec wykorzystano kiszonkę sorgo cukrowego (*Sorghum saccharatum*). Fermentacji poddawano całe rośliny zawierające liście, łodygi oraz kolby. Świeża biomasa roślinna pochodziła ze ściśłych doświadczeń polowych prowadzonych w 2008 roku przez pracowników Katedry Agrotechnologii i Zarządzania Produkcją Roślinną Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, w Zakładzie Produkcji i Doświadczalnym zlokalizowanym w Bałcynach (województwo warmińsko-mazurskie). Sorgo cukrowe (odmiana – *Sucrosorgo 506*) uprawiano na glebie płowej typowej, średnio pylastej, wytworzonej z gliny średniej, klasy bonitacyjnej IIIa, zaliczanej do 2. kompleksu rolniczej przydatności. Przed siewem glebę nawożono fosforem w stężeniu 34,9 kg/ha oraz azotem – 100 kg/ha. Siew przeprowadzono pod koniec III dekady maja. Gęstość siewu oraz rozstawa rzędów wynosiły odpowiednio 24 rośliny/m² i 75 cm. Po siewie zastosowano pielęgnację chemiczną w formie Lumax 537,5 oraz SE w dawce 2,5 dm³/ha. W stadium wzrostu BBCH 12 ponowiono nawożenie azotem w ilości 60 kg/ha. Zbiór sorgo przeprowadzono w fazie dojrzałości mleczno-woskowej, za pomocą sieczkarni samobieżnej wyposażonej w bębnowy zespół rozdrabniający biomasa na fragmenty o długości 2 ÷ 3 cm.

Świeżą masę poddano procesowi konserwacji przez zakiszanie. W tym celu próby materiału roślinnego zagęszczono w silosach o objętości 100 dm³ wyłożonych folią przez okres 90 dni. Jako dodatek do zakiszania użyto kwasu mrówkowego w stężeniu 85%, w proporcji 5 g na 1 kg kiszonej biomasy.

PRZYGOTOWANIE SUROWCA DO FERMENTACJI

Przed użyciem do badań kiszonkę rozdrabniano w młynku tnącym (Retsch SM100, Niemcy) (rys. 1), a następnie 2-krotnie przesiewano przez dwa sita o różnej średnicy oczek. Pierwsze przesiewania prowadzono na sitach o średnicy oczek równej 1,5 mesh, natomiast drugie – na sitach o średnicy oczek 0,5 mesh. Stężenie suchej pozostałości ogólnej wynosiło 0,1412 g s.m./g, w tym stężenie suchej pozostałości organicznej – 0,1373 g s.m./g. Kiszonka sorgo cukrowego charakteryzowała się wysoką zawartością cukrów rozpuszczalnych, kształtującą się na poziomie 17,5% s.m. Stężenie lignin, celuloz oraz hemi-



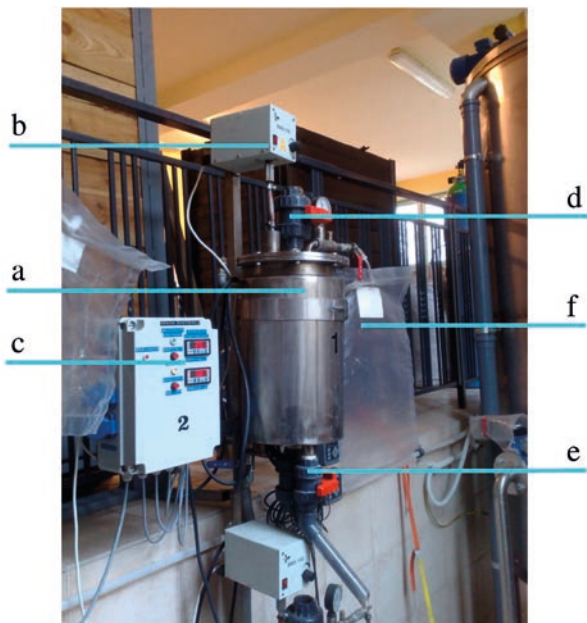
Rys. 1. Młynek tnący (Retsch SM100, Niemcy)

celuloz wynosiło odpowiednio 2,3, 19,2 i 17,3% s.m. Po rozdrobnieniu kiszonkę przechowywano w plastikowych workach, w temperaturze 4°C.

STANOWISKO BADAWCZE

Badania prowadzono w reaktorze o pojemności czynnej 6 dm³, pracującego w warunkach beztlenowych. Fermentor był wyposażony w mieszadło o regulowanej prędkości obrotów, płaszcz wodny pozwalający utrzymać stałą temperaturę w reaktorze oraz system odbioru biogazu (rys. 2).

Obsługę reaktora prowadzono w następujący sposób: raz na dobę o stałej porze, za pomocą wypustu umiejscowionego u dołu reaktora, odbierano określoną ilość pozostałości po fermentacji. W każdej z prób dokonano dwukrotnego oznaczenia parametrów, to jest: suchej pozostałości ogólnej, suchej pozostałości organicznej, odczynu, zasadowości, chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT) oraz stężeń lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) i azotu amonowego. Następnie, poprzez zawór zasilania, doprowadzano nową porcję wsadu surowcowego, w objętości równej objętości odbieranej z fermentora pozostałości po fermentacji. Przed wprowadzeniem do reaktora wsad surowcowy podgrzewano do temperatury, przy której prowadzono proces. Równoległe, w analogiczny sposób przygotowywano próbkę kontrolną wsadu surowcowego, w której dokonano oznaczenia następujących parametrów: suchej pozostałości ogólnej, suchej pozostałości organicznej oraz odczynu. Natomiast dwukrotnego pomiaru stężeń dokonano w przypadku lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) i azotu amonowego. Odbiór pozostałości po fermentacji oraz dozowanie wsadu surowcowego prowadzono nie przerywając mieszania. Wytworzony biogaz zbierano do worków tadelrowych wykonanych z tworzywa (PN-EN ISO 11734:2003), a następnie analizowano jego skład i objętość, za



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: a – reaktor beztlenowy, b – włącznik i regulator szybkości mieszadła, c – pomiar temperatury, d – zawór zasilania reaktora, e – wypust odbioru pozostałości po fermentacji, f – worek tadelrowy

pomocą przenośnego analizatora gazu. Fermentację prowadzono w temperaturze $39(\pm 0,2)^{\circ}\text{C}$, którą uzyskiwano utrzymując stałą temperaturę wody znajdującą się w płaszczu grzejnym otaczającym reaktor. Liczba obrotów mieszadła wynosiła 50 obr./min.

ZAŁOŻENIA EKSPERYMENTU

Przygotowanie wsadu surowcowego do badań polegało na wymieszaniu kiszonki sorgo cukrowego z wodą wodociągową. W tym celu odważono 100 g surowca, a następnie dodawano wodę do uzyskania łącznej objętości wynoszącej 166 cm^3 . Stężenie suchej pozostałości ogólnej we wsadzie surowcowym kształtowało się na średnim poziomie $8,5(\pm 0,38)\%$, a stężenie suchej pozostałości organicznej – $7,8(\pm 0,61)\%$. Wsad surowcowy charakteryzował się ponadto niskim odczynem ($\text{pH } 3,75 \pm 0,04$) oraz wysoką zawartością lotnych kwasów tłuszczowych – $2648(\pm 133,3)\text{ mg C}_2\text{H}_4\text{O}_2/\text{dm}^3$. Stężenie azotu amonowego w przesączu wynosiło $112\text{ mg N-NH}_4/\text{dm}^3$. Doświadczenie prowadzono przy hydraulicznym czasie zatrzymania wynoszącym 60 d. Z tego powodu ilość wsadu surowcowego doprowadzanego do reaktora wynosiła $100\text{ cm}^3/\text{d}$.

METODY ANALITYCZNE

Kontrola analityczna procesu obejmowała analizę surowca (kiszonki sorgo cukrowego), wsadu surowcowego oraz objętości i składu powstającego biogazu.

W surowcu oznaczano: suchą masę (PN-EN 12880:2004), suchą masę organiczną jako straty przy prażeniu (PN-EN 12880:2004), cukry rozpuszczalne, metodą antronową [3], włókna obojętno-detergentowe (NDF), włókna kwaśno-detergentowe (ADL) oraz ligniny (ADL), metodą Wansoesta [11], celulozę i hemicelulozy oraz skład elementarny w odniesieniu do C, H, N.

Udział hemiceluloz obliczano z różnicy włókien obojętno-detergentowych i kwaśno-detergentowych, natomiast celulozy – włókien kwaśno-detergentowych i lignin. Zawartość węgla, azotu oraz wodoru w biomasie wykonano w Instytucie Chemii Organicznej PAN w Warszawie, przy użyciu analizatora elementarnego VarioEL firmy Elementar (Niemcy).

We wsadzie surowcowym oznaczano: suchą masę (PN-EN 12880:2004) oraz suchą masę organiczną jako straty przy prażeniu (PN-EN 12880:2004).

W fazie wodnej wsadu surowcowego oznaczano: odczyn (PN-90/C-04540/01), azot amonowy metodą destylacji bezpośredniej (PN-ISO 5664:2002) oraz lotne kwasy tłuszczowe metodą destylacji bezpośredniej (PN-75 C-04616/04).

PARAMETRY TECHNOLOGICZNE FERMENTACJI METANOWEJ

Efektywność fermentacji metanowej zależy od warunków operacyjnych procesu. Do najważniejszych parametrów technologicznych zalicza się:

- hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego w komorze fermentacji t_h ,
- obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem organicznym ORL ,
- jednostkową szybkość produkcji biogazu r_B ,
- jednostkową szybkość produkcji metanu r_M ,
- współczynnik wydajności biogazu Y_B ,
- współczynnik wydajności metanu Y_M ,
- zredukowany ładunek substancji organicznych F_{us} .

Wymienione parametry technologiczne obliczono z podanych równań (1-7).

1. Hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego w komorze fermentacji jest to stosunek objętości czynnej komory fermentacji do objętości wsadu surowcowego wprowadzonego do komory w jednostce czasu:

$$t_h = \frac{V}{Q} \quad (1)$$

gdzie:

t_h – hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego w komorze fermentacji [d],

V – objętość czynna komory fermentacji [dm^3],

Q – objętość wsadu surowcowego doprowadzona do komory fermentacji w jednostce czasu [dm^3/d].

2. Obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem organicznym jest to masa substancji organicznych wprowadzanych do komory fermentacji w jednostce czasu na jednostkę objętości czynnej komory:

$$OLR = \frac{C \cdot Q}{V} \quad (2)$$

gdzie:

OLR – obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem organicznym [$\text{kg s.m.o.}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$],

C – stężenie substancji organicznych we wsadzie surowcowym [$\text{kg s.m.o.}/\text{m}^3$].

3. Jednostkowa szybkość produkcji biogazu jest to objętość biogazu wytwarzana w jednostce czasu na jednostkę objętości czynnej komory fermentacji:

$$r_B = \frac{v_B}{V} \quad (3)$$

gdzie:

r_B – jednostkowa szybkość produkcji biogazu [$\text{dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$],

v_B – objętość biogazu wytwarzana w jednostce czasu [dm^3/d].

4. Jednostkowa szybkość produkcji metanu jest to objętość metanu wytwarzana w jednostce czasu na jednostkę objętości czynnej komory fermentacji:

$$r_M = \frac{v_M}{V} \quad (4)$$

gdzie:

r_M – jednostkowa szybkość produkcji metanu [$\text{dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$],

v_M – objętość metanu wytwarzana w jednostce czasu [dm^3/d].

5. Współczynnik wydajności biogazu jest to objętość biogazu wytwarzana na jednostkę stężenia substancji organicznych doprowadzanych do komory fermentacji w jednostce czasu:

$$Y_B = \frac{v_B}{Q \cdot C} \quad (5)$$

gdzie:

Y_B – współczynnik wydajności biogazu [$\text{dm}^3/\text{g s.m.o.}$].

6. Współczynnik wydajności metanu jest to objętość metanu wytwarzana na jednostkę stężenia substancji organicznych doprowadzanych do komory fermentacji w jednostce czasu:

$$Y_M = \frac{v_M}{Q \cdot C} \quad (6)$$

gdzie:

Y_M – współczynnik wydajności metanu [$\text{dm}^3/\text{g s.m.o.}$].

7. Zredukowany ładunek substancji organicznych jest iloczynem redukcji stężenia substancji organicznych i natężenia przepływu:

$$F_{us} = (C - C_{odphw}) \cdot Q \quad (7)$$

gdzie:

F_{us} – zredukowany ładunek substancji organicznych [$\text{g s.m.o.}/\text{d}$],

C_{odphw} – stężenie substancji organicznych w pozostałości po fermentacji [$\text{g s.m.o.}/\text{dm}^3$].

Poniżej przedstawiono sposób obliczenia poszczególnych parametrów technologicznych fermentacji.

1. Hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego w komorze fermentacji t_h :

W przeprowadzonym doświadczeniu objętość czynna komory fermentacyjnej wynosiła $V = 6 \text{ dm}^3$, a objętość wsadu surowcowego wprowadzana do komory – $Q = 0,1 \text{ dm}^3/\text{d}$. Stąd hydrauliczny czas zatrzymania wsadu surowcowego kształtował się na poziomie:

$$t_h = \frac{6}{0,1} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3/\text{d}} \right]$$

$$t_h = 60 \text{ d}$$

2. Obciążenie objętości czynnej komory fermentacji ładunkiem substancji organicznych OLR :

Przyjmując stężenie suchej masy organicznej we wsadzie surowcowym na poziomie 7,8%, co odpowiada 78,5 g s.m.o./ dm^3 , OLR obliczono z równania:

$$OLR = \frac{78,5 \cdot 0,0001}{0,006} \left[\frac{\text{kg s.m.o.} \cdot \text{m}^3/\text{d}}{\text{m}^3} \right]$$

$$OLR = 1,3 \text{ kg s.m.o.}/\text{d}$$

3. Jednostkowa szybkość produkcji biogazu r_B :

Z danych eksperymentalnych wynika, że objętość biogazu wytwarzana w ciągu doby wyniosła $V_B = 4,75 \text{ dm}^3/\text{d}$, przy objętości czynnej komory fermentacji $V = 6 \text{ dm}^3$. Szybkość produkcji biogazu r_B wyniosła zatem:

$$r_B = \frac{4,75}{6} \left[\frac{\text{dm}^3/\text{d}}{\text{dm}^3} \right]$$

$$r_B = 0,7917 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$$

4. Jednostkowa szybkość produkcji metanu r_M :

W badaniach doświadczalnych oznaczono, że przy objętości komory fermentacyjnej $V = 6 \text{ dm}^3$ objętość metanu wytwarzana w ciągu doby wyniosła $V_M = 2,6287 \text{ dm}^3/\text{d}$, co stanowiło podstawę do obliczenia jednostkowej szybkości produkcji metanu:

$$r_M = \frac{2,6287}{6} \left[\frac{\text{dm}^3/\text{d}}{\text{dm}^3} \right]$$

$$r_M = 0,4381 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$$

5. Współczynnik wydajności biogazu Y_B :

Dysponując objętością wsadu surowcowego wprowadzanego do komory fermentacji w jednostce czasu ($Q = 0,1 \text{ dm}^3/\text{d}$), stężeniem suchej masy organicznej (78,5 g s.m.o./ dm^3) we wsadzie surowcowym oraz objętością biogazu wytwarzaną w ciągu doby ($V_B = 4,75 \text{ dm}^3/\text{d}$), obliczono współczynnik wydajności biogazu, stosując poniższe równanie:

$$Y_B = \frac{4,75}{0,1 \cdot 78,5} \left[\frac{\text{dm}^3/\text{d}}{\text{dm}^3/\text{d} \cdot \text{g s.m.o.}/\text{dm}^3} \right]$$

$$Y_B = 0,61 \text{ dm}^3/\text{g s.m.o.}$$

6. Współczynnik wydajności metanu Y_M :

Z badań doświadczalnych wynika, że przy objętości wsadu sorgo cukrowego $Q = 0,1 \text{ dm}^3/\text{d}$ oraz stężeniu substancji organicznych we wsadzie surowcowym $C = 78,5 \text{ g s.m.o.}/\text{dm}^3$ dobowa objętość metanu wytwarzana w ciągu doby wynosiła $V_M = 2,6287 \text{ dm}^3/\text{d}$. Dane te stanowią podstawę do obliczenia Y_M :

$$Y_M = \frac{2,6287}{0,1 \cdot 78,5} \left[\frac{\text{dm}^3/\text{d}}{\text{dm}^3/\text{d} \cdot \text{g s.m.o.}/\text{dm}^3} \right]$$

$$Y_M = 0,33 \text{ dm}^3/\text{g s.m.o.}$$

7. Zredukowany ładunek substancji organicznych F_{us} :

Do obliczenia F_{us} wykorzystano stężenie substancji organicznych, które zredukowano w wyniku fermentacji C_{us} . Wartość C_{us} wyniosła 60,8 g s.m.o./ dm^3 :

$$F_{us} = (78,5 - 17,7) \cdot 0,1 \left[\text{g s.m.o./dm}^3 \cdot \text{dm}^3/\text{d} \right]$$

$$F_{us} = 6,08 \text{ g s.m.o./d}$$

WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone w skali laboratoryjnej badania miały na celu określenie wydajności biogazu, stężenia metanu w biogazie oraz składu chemicznego odpadów pofermentacyjnych. Analiza chemiczna wsadu surowcowego pozwoliła na obliczenie podstawowych parametrów procesu.

Uśrednione wyniki badań parametrów chemicznych wsadu surowcowego, to jest rozcieńczonej wodą wodociągową kiszonki sorgo cukrowego po jej uprzednim rozdrobnieniu, podano w tabl. 1.

Wsad surowcowy charakteryzował się stężeniem suchej masy na poziomie 8,5% ($\pm 0,38$). Stężenie lotnych kwasów tłuszczowych wyniosło średnio 2648 mg/dm³ ($\pm 133,3$), a azotu amonowego – 112,0 mg N-NH₄/dm³ ($\pm 0,177$).

W tabl. 2 zestawiono parametry technologiczne fermentacji metanowej kiszonki sorgo cukrowego wraz z wydajnością biogazu, ze wskazaniem wartości średnich.

Obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem substancji organicznych wyniosło 1,3 g s.m.o./dm³·d ($\pm 0,10$), podczas gdy zredukowany ładunek substancji organicznych kształtował się na poziomie 6,08 g s.m.o./d.

Tabl. 1. Charakterystyka chemiczna kiszonki przygotowanej do fermentacji

Parametr	Jednostka	Wartość	Odchylenie standardowe
Sucha pozostała ogólna	%	8,5	$\pm 0,38$
Sucha pozostała organiczna	%	7,8	$\pm 0,61$
Odczyn	pH	3,75	$\pm 0,04$
Lotne kwasy tłuszczowe (LKT)	mg/dm ³	2648	$\pm 133,3$
Azot amonowy	mg N-NH ₄ /dm ³	112,0	$\pm 0,177$

Podczas trwania badań odnotowano dobową produkcję biogazu wynoszącą 4,75 dm³/d. Uzyskany biogaz charakteryzował się zawartością metanu na poziomie 2,6287 dm³, co stanowi około 55,34%, a udział CO₂ kształtował się na poziomie 2,0639 dm³, co odpowiada w przybliżeniu 43,45%. Z danych literaturowych wynika, że koncentracja metanu w powstającym biogazie może osiągnąć wartość 64,4% [9]. Dla kiszonki z kukurydzy koncentracja metanu w wytwarzanym biogazie wynosi 52% [6]. Natomiast jednostkowa produkcja biogazu wynosiła 0,7917 dm³/dm³·d, a współczynnik wydajności biogazu 0,61 dm³/g s.m.o. Porównując wartość wskaźnika produkcji biogazu uzyskaną w niniejszych badaniach z danymi literaturowymi można stwierdzić, że był wyższy niż w przypadku procesu fermentacji kukurydzy zwyczajnej. Badania prowadzone nad fermentacją kukurydzy zwyczajnej wykazały, że w zależności od odmiany oraz fazy wzrostu współczynnik wydajności biogazu mieści się w zakresie od 0,387 dm³/g s.m.o. (Atalante FAO 290, faza 3) do 0,545 dm³/g s.m.o. (Phonix FAO 290, faza 1) [1]. Jednostkowa produkcja metanu wynosiła 0,4381 dm³/dm³·d przy wartości współczynnika wydajności metanu równym 0,33 dm³/g s.m.o.

Produktem fermentacji metanowej, oprócz biogazu, są również odpady pofermentacyjne zawierające substancje organiczne, które nie uległy konwersji do biogazu oraz przyrost biomasy. Ich skład jest istotny ze względu na dobór właściwych metod dalszego przetwarzania. Charakterystykę odpadów pofermentacyjnych podano w tabl. 3.

Czynnikami mającym decydujący wpływ na przebieg fermentacji jest odpowiedni odczyn. Za optymalny w rozwoju metanogenów uznaje się odczyn w przedziale od pH 6,7 do pH 7,4, chociaż niektóre gatunki zachowują swoją aktywność nawet poniżej pH 6 [2]. W trakcie prowadzenia procesu fermentacji odpady pofermentacyjne charakteryzowały się odczynem zbliżonym do obojętnego oraz stężeniem suchej pozostałości ogólnej 27,7 g s.m.o./dm³ ($\pm 1,8$), w tym sucha pozostałość organiczna stanowiła 63,9%. Obniżenie odczynu poniżej pH 6,6 powoduje początkowo spowolnienie, a następnie zahamowanie produkcji biogazu, co wynika ze spadku liczby metanogenów [8]. Wartość ChZT kształtowała się na poziomie 1320 mg O₂/dm³ (± 328). Podczas prowadzenia procesu fermentacji odnotowano wzrost zawartości lotnych kwasów tłuszcz-

Tabl. 2. Parametry technologiczne fermentacji metanowej kiszonki sorgo cukrowego oraz wydajność biogazu

Parametr	Jednostka	Wartość	Odchylenie standardowe
Hydrauliczny czas zatrzymania t_h	d	60	–
Obciążenie objętości czynnej komory ładunkiem substancji organicznych OLR	g s.m.o./dm ³ ·d	1,3	$\pm 0,10$
Zredukowany ładunek substancji organicznych F_{us}	g s.m.o./d	6,08	–
Dobowa produkcja biogazu	dm ³ /d	4,75	$\pm 1,09$
Stężenie CH ₄ w biogazie	%	55,34	$\pm 5,5$
Zawartość CO ₂	%	43,45	$\pm 6,92$
Szybkość produkcji biogazu r_B	dm ³ /dm ³ ·d	0,7917	$\pm 0,18$
Szybkość produkcji metanu r_M	dm ³ /dm ³ ·d	0,4381	$\pm 0,19$
Współczynnik wydajności biogazu Y_B	dm ³ /g s.m.o.	0,61	$\pm 0,21$
Współczynnik wydajności metanu Y_M	dm ³ /g s.m.o.	0,33	$\pm 0,13$

Tabl. 3. Charakterystyka odpadów pofermentacyjnych

Wskaźnik	Jednostka	Wartość	Odchylenie standardowe
Sucha pozostałość ogólna	g s.m./dm ³	27,7	± 1,8
Sucha pozostałość organiczna	g s.m.o./dm ³	17,7	± 1,9
Odczyn	pH	7,24	± 0,19
Zasadowość	mval/dm ³	66,2	± 17,4
ChZT	mg O ₂ /dm ³	1320	± 328
LKT	mg/dm ³	1555,7	± 377,9
Azot amonowy	mg N-NH ₄ /dm ³	447,8	± 51,6

czowych, których stężenie wyniosło 1555,7 mg/dm³(± 377,9). Zawartość azotu amonowego kształtowała się na poziomie 447,8 mg N-NH₄/dm³(± 51,6).

WNIOSKI

1. Badania wykazały, że sorgo cukrowe stanowi dobry surowiec do wytwarzania biogazu, czego potwierdzeniem jest wysoki stopień jego przefermentowania wynoszący 77,5%.
2. Współczynnik wydajności biogazu wynosił $Y_B = 0,61 \text{ dm}^3/\text{g s.m.o.}$, przy średnim stężeniu metanu w biogazie 55%.
3. Przy hydraulicznym czasie zatrzymania wsadu surowcowego $t_h = 60$ dni szybkość produkcji biogazu kształtowała się na poziomie $r_B = 0,7917 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$.
4. Średnia dobową produkcją biogazu wynosiła 4,75 dm³/d.

PODSUMOWANIE

Do czasów obecnych sorgo cukrowe służyło jako kiszonka dla zwierząt hodowlanych, dzieląc miejsce z kukurydzą. Często uznawane za gorszy surowiec do produkcji kiszonki, bardzo szybko zostało docenione, jako roślina mająca inne, perspektywiczne i ważne znaczenie.

Obecnie coraz częściej jest spotykana fermentacja sorgo cukrowego, w którym upatruje się alternatywę dla kukurydzy, zastępując ją na terenach suchych, o dużym nasłonecznieniu. Wydajność biogazu z zielonej masy roślin po 20-dniowej fer-

mentacji dla sorgo cukrowego wynosi $640 \div 670 \text{ m}^3/\text{t}$ suchej masy organicznej. W celu porównania wydajność biogazu z kukurydzy wynosi $530 \div 750 \text{ m}^3/\text{t}$ suchej masy organicznej [5]. Dane te z całą pewnością mogą świadczyć o wysokich możliwościach odmiany *Sucrosorgo 506*.

LITERATURA

1. Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Zollitsch W., Mayer K., Buga S., Amid A.: Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- bis spätreifen Maissorten. In: BAL Gumpenstein (Ed.) Beitrag zur 54. Züchtertagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs, 25. bis 27. November 2003.
2. Buraczewski G.: Fermentacja metanowa. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1989.
3. Daniels L., Hanson R. S., Phillips J. A.: Metabolism. Chemical Analysis, in: Gerhardt P., Wood W. A. (Eds). Methods for General and Molecular Bacteriology. American Society for Microbiology, Washington 1994.
4. Dolcioti, A., Mambelli, S., Grandi, S., Venturi, G.: Comparison of two Sorghum genotypes for sugar and fiber production, Industrial Crops and Production, 7, 1996.
5. El Bassam N.: Energy plant species, James and James Science Publishers, London 1998.
6. Głazka A., Wardal W. J., Romaniuk W., Domasiewicz T.: Biogazownie rolnicze. Monografia, Multico Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.
7. Lewandowski W.: Proekologiczne odnawialne źródła energii. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
8. Mosey F. E., Fernandes X. A.: Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic-digestion of milk-sugar. Water Science and Technology 21, 1989.
9. Riano B., Molineuevo B., Garcia-Gonzalez M. C.: Potential for methane production from anaerobic co-digestion of swine with winery wastewater. Bioresource Technology 102, 2011.
10. Roman G. V., Mitroi A., Roman Ana M., Ion V., Dumbrava M.: Sweet sorghum an energetical crop of the future in Romania. In: Proceedings of the 10th European Conference on Biomass for Energy and Industry, C.A.R.M.E.N., Wurzburg, Germany, 8-11 June 1998.
11. Skulmowski J.: Metody określania składu pasz i ich jakości, Państwowe Wydawnictwa Rolnicze i Leśne, Warszawa 1974.
12. Patent nr US 7883884 B2, USA.
13. Patent nr US 5616163 A, USA.
14. Zgłoszenie patentowenr nr US 2009/0017487 A1, USA.
15. Zgłoszenie patentowenr nr US 2006/0006111 A1, USA.