

Monika CZOP, Ewelina KŁAPCIA

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: Monika.Czop@polsl.pl, ewelina.klapcia@onet.pl

Zagospodarowanie odchodów trzody chlewnej z wybranej fermy do celów energetycznych

Management of Pigs' Droppings from a Selected Farm for Energetic Purposes

Changes that occur in the energy market force to find out new solutions for searching alternative sources to assure energetic safety and self-sufficiency in this sector of economy. Following these criteria, Council of Ministers in 2010 established on a document called „Directions of development of agricultural biogas plants for the period of time 2010-2020. The document assumed that average 1 biogas plant of 1 MW capacity will be built in each commune. According to these assumptions approximately 2 thousands plants with total power of 2 thousands MWe would be created. The estimated theoretical production capacity in Poland of agricultural biogas based on animals dropping (manure and slurry) exceeds 3M m³. The article presents test results of physic-chemical properties of barley straw, corn cob mix and pig's droppings.

Keywords: agricultural waste, biomass, pig manure, biogas, clean energy

Wprowadzenie

Niewłaściwe postępowanie z odpadami może w istotny sposób oddziaływać zarówno lokalnie, jak i globalnie na całe środowisko przyrodnicze oraz na zdrowie ludzi. Negatywny wpływ odpadów na środowisko można ograniczyć poprzez stosowanie zasad gospodarowania odpadami określonych w Ustawie [1]. Podstawowym założeniem gospodarowania odpadami jest właściwa hierarchia postępowania z nimi - Reduce, Reuse, Recycle, Recover (Zmniejszenie/ograniczenie, Ponowne użycie, Recykling, Odzysk) [1-3]. Głównym założeniem hierarchii [2] jest idea promująca „społeczeństwa recyklingu”, dążące przede wszystkim do ograniczenia wytwarzania odpadów i do wykorzystywania ich jako zasobów materiałowych oraz energetycznych (rys. 1).

Wiele odpadów rolniczych, ze względu na swoje właściwości fizyczno-chemiczne, może być cennym surowcem energetycznym i ekonomicznym. Produkty uboczne rolnictwa, płynne lub stałe odchody zwierzęce czy pozostałości przemysłu rolno-spożywczego mogą być wykorzystane do produkcji biogazu rolniczego.



Rys. 1. Hierarchia postępowania z odpadami [1-4]

Fig. 1. The waste hierarchy [1-4]

Ciągły wzrost cen paliw konwencjonalnych, zwiększenie zapotrzebowania na energię, która w dużym stopniu jest dostarczana z nieodnawialnych źródeł, pogarszający się stan środowiska naturalnego, a także zobowiązania Polski jako kraju członkowskiego Unii Europejskiej skłaniają Polskę do podjęcia działań związanych z racjonalnym wykorzystaniem dostępnych zasobów do produkcji energii cieplnej i elektrycznej. Poprawa efektywności energetycznej państwa, ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko oraz rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii są tylko jednymi z kilku podstawowych kierunków polskiej polityki energetycznej [5].

Jedną z metod wytwarzania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych w Polsce jest produkcja biogazu rolniczego. Zgodnie z definicją zawartą w Ustawie z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, „biogaz rolniczy jest to gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, lub biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż zaewidencjonowane jako rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu pozyskanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów” [6].

Z uwagi na znaczną liczbę ferm i gospodarstw rolnych, dużą dostępność surowców oraz stwarzające ogromne możliwości powierzchnie ugorów i odłogów, które mogą być wykorzystane do uprawy roślin energetycznych, Polska może zapewnić stabilne warunki dostaw surowców do produkcji biogazu.

Dotychczas głównym źródłem biogazu były oczyszczalnie ścieków oraz składowiska odpadów, jednakże zgodnie z Krajowym Planem działań w zakresie energii ze źródeł odnawialnych prognozuje się budowę dużej liczby biogazowni rolniczych.

Agencja Rynku Rolnego na podstawie prowadzonego rejestru wytwórców biogazu rolniczego podaje, że w Polsce od 2011 roku zarejestrowano 77 biogazowni rolniczych. W obiektach tych wsad do instalacji stanowią lokalnie dostępne surowce. Definicję mikroinstalacji określa Ustawa o odnawialnych źródłach energii, zgodnie z którą „mikroinstalację stanowi instalacja odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 40 kW, przyłączona do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 120 kW” [6, 7].

Wsad do produkcji biogazu rolniczego w biogazowniach rolniczych mogą stanowić odpady poprodukcyjne, pochodzące z własnego gospodarstwa rolnego, takie jak gnojowica czy obornik. Do wsadu mogą być również dodawane inne komponenty, jak np. słoma, siano, kiszonka kukurydzy, buraki czy trawy oraz resztki żywności i pasz.

Obecnie w krajach europejskich rozwija się trend budowy małych, indywidualnych, rolniczych biogazowni, których moc zainstalowana wynosi kilkadziesiąt kWe. O możliwości zainstalowania takiej instalacji decyduje wielkość prowadzonej produkcji - zakłada się, że na potrzeby instalacji o mocy 40 kW wymagane jest 15÷26 ha upraw oraz 70÷270 DJP pogłównia zwierząt (DJP - duża jednostka przeliczeniowa) [8].

Największe doświadczenie w zakresie rozwoju biogazowni rolniczych mają Niemcy, gdzie na koniec 2015 roku funkcjonowało 8928 biogazowni [9]. W Polsce rynek ten jest słabo rozwinięty, mimo że znaczna liczba gospodarstw rolnych posiada odpowiednie zaplecze substratów bez konieczności dostarczania ich z zewnątrz [10]. Zachętą do produkcji biogazu jest fakt, iż w przeciwieństwie do innych OZE, zależnych od czynników atmosferycznych, biogazownia zapewnia wysoką stabilność produkcji energii na niezmiennym poziomie pod warunkiem zagwarantowania stałego dopływu surowców [8]. Wykorzystanie odpadów poprodukcyjnych z rolnictwa chroni środowisko przed zanieczyszczeniami, gdyż w ten sposób rozwiązywany jest problem odpadów organicznych, a powstała w procesie masa pofermentacyjna może zostać wykorzystana do nawożenia gleby. Kluczowym aspektem, mającym wpływ na rozwój inwestycji do produkcji biogazu, jest możliwość wykorzystania energii elektrycznej i ciepła wytworzonych z biogazu do użytku w gospodarstwie domowym oraz w gospodarstwie rolnym, co eliminuje koszty zakupu energii, a niewykorzystany nadmiar energii elektrycznej może być odprowadzany do sieci, z czego można uzyskać przychody. Zgodnie z proponowanym przez Ustawę OZE systemem wsparcia, energia produkowana w instalacji o mocy do 40 kW po dokonaniu rejestracji w ARR (Agencja Rynku Rolnego) będzie mogła być wykorzystywana na własne potrzeby bez konieczności zakładania działalności gospodarczej, natomiast nadwyżka energii może być odsprzedawana do sieci po cenie 80% ceny zeszłorocznej [8]. Ustawa z dnia 22 czerwca 2016 r. o zmianie ustawy o odnawialnych źródłach energii oraz niektórych innych ustaw (DzU 2016, poz. 925) wprowadziła tzw. system aukcji energii z OZE. System aukcji ma premiować przede wszystkim technologie wytwarzające energię w sposób stabilny i przewidywalny. Rozpatrując te dwa założenia, można powiedzieć,

że potrzeby rządu spełniają zdecydowanie biogazownie rolnicze, które teraz będą mogły spokojnie się rozwijać. W czasie pierwszej aukcji na wsparcie zielonej energii rząd zdecydował się kupić energię z istniejących biogazowni oraz elektrowni wodnych, a także nowych instalacji słonecznych i wiatrowych.

1. Polityka energetyczna Polski

Wzrost znaczenia biogazowni oraz zainteresowania tematyką pozyskiwania energii z biogazu rolniczego spowodowany jest zmianami w regulacjach prawnych, które zostały przystosowane do prawa unijnego. Istotny wpływ mają również wprowadzone systemy dopłat, chęć zysku ze sprzedaży niewykorzystanej energii, a także pomoc w formie dokumentów wskazujących kierunki rozwoju biogazowni rolniczych oraz promujących produkcję biogazu rolniczego.

Dnia 13 lipca 2010 r. Rada Ministrów przyjęła opracowany przez Ministerstwo Gospodarki dokument „Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010-2020”, którego celem jest stworzenie optymalnych warunków do rozwoju biogazowni rolniczych oraz wskazanie możliwości ich współfinansowania ze środków publicznych, a także wdrożenie działań edukacyjnych i promujących budowę oraz eksploatację tego typu instalacji. Dokument zakłada, że dzięki realizacji wyżej wymienionych celów można stworzyć średnio jedną biogazownię rolniczą w każdej gminie do 2020 roku, przyjmując, że gmina będzie posiadać odpowiednie do tego predyspozycje. Dokument przewiduje również efekty, jakie mogą być uzyskane przy wykonaniu powyższych celów. Wśród tych wymienia się rozwój lokalnych wytwórni biogazu i pozyskiwanie z nich biogazu, dzięki czemu nie tylko ulegnie poprawie bezpieczeństwo energetyczne kraju, ale również może nastąpić wzrost zatrudnienia lokalnej społeczności oraz wzrost dochodów gmin. Niewątpliwą korzyścią jest również unieszkodliwienie ubocznych produktów rolnictwa i pozostałości z przemysłu rolno-spożywczego, a także uzyskanie nawozów organicznych z masy pofermentacyjnej [11, 12].

Zapisy Ustawy z dnia 8 stycznia 2010 roku o zmianie Ustawy Prawo energetyczne oraz o zmianie niektórych innych Ustaw (DzU Nr 21, poz. 104) mogą usprawnić rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii, w tym biogazowni rolniczych, gdyż przewidują one określenie warunków przyłączenia instalacji biogazu rolniczego do sieci dystrybucji gazowej przez przedsiębiorstwa, które zajmują się przesyłem paliw gazowych. Ustawa reguluje również obowiązek wpisu do rejestru przedsiębiorstw energetycznych, zajmujących się wytwarzaniem biogazu rolniczego lub energii elektrycznej z biogazu. Do prowadzenia rejestru oraz monitoringu i kontroli przedsiębiorstw zobowiązany został prezes Agencji Rynku Rolnego [12, 13].

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii podaje zasady oraz warunki wykonywania działalności w zakresie wytwarzania biogazu rolniczego oraz energii elektrycznej z niego wytworzonej. W rozdziale 3 określono możliwość sprzedaży energii elektrycznej wytworzonej z biogazu rolniczego w instalacji, którą wykonano na własne potrzeby, lecz nie wykorzystano jej w całości. Istnieje również możliwość sprzedaży niewykorzystanego biogazu rolniczego

wytworzonego w instalacji odnawialnego źródła energii o rocznej wydajności nie większej niż 160 tys. m³ i wprowadzonego do sieci. Ponadto wytwarzanie i sprzedaż energii elektrycznej z biogazu rolniczego oraz samego biogazu rolniczego nie jest działalnością gospodarczą. Prowadzenie działalności gospodarczej w zakresie wytwarzania energii elektrycznej z OZE w przypadku wytwarzania energii z biogazu rolniczego nie wymaga uzyskania koncesji na zasadach określonych w Ustawie Prawo energetyczne. Natomiast rozdział 4 Ustawy o odnawialnych źródłach energii określa mechanizmy oraz instrumenty wsparcia wytwarzania energii biogazu rolniczego [6].

Parametry jakościowe biogazu rolniczego wprowadzanego do sieci dystrybucyjnej gazowej, wymagania dotyczące pomiarów, rejestracji i sposobu obliczania ilości wytwarzanego biogazu rolniczego, a także sposób przeliczania ilości wytworzonego biogazu rolniczego na ekwiwalentną ilość energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnych źródłach energii oraz warunki przyłączenia do sieci dystrybucyjnej gazowej instalacji wytwarzania biogazu rolniczego określa Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 24 sierpnia 2011 roku w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku potwierdzenia danych dotyczących wytwarzanego biogazu rolniczego wprowadzanego do sieci dystrybucyjnej gazowej [14].

2. Charakterystyka analizowanej ферmy

Podstawową produkcją analizowanej ферmy jest chów i hodowla trzody chlewnej, która odbywa się w cyklu zamkniętym. Obecnie stado liczy 25 000 sztuk, w tym 2000 macior. Na tej bazie produkuje się rocznie do 54 000 stukilowych tuczników (tab. 1).

Ferma prowadzi również produkcję rolną. Na 1250 ha uprawiany jest jęczmień, pszenica, kukurydza, rzepak oraz żyto. Produkcja zbóż przeznaczona jest w głównej mierze na paszę dla trzody chlewnej, pozostała część mogłaby być wykorzystywana w biogazowni.

Tabela 1. Liczebność stada w cyklu zamkniętym analizowanej ферmy [15, 16]

Table 1. Number of herds in a closed cycle of the analyzed farm [15, 16]

Rodzaj zwierząt	Stan średnioroczny szt.	Współ. przeliczania ¹⁾ sztuk rzeczywistych na DJP ²⁾	Stan średnioroczny w przeliczeniu na DJP
Knury	50	0,3	15
Maciory	2400	0,3	720
Prosięta	10 350	0,02	207
Warchlaki	10 143	0,1	1014,3
Tuczniaki	7151	0,25	1787,75
Suma	30 094	–	3744

¹⁾ Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2010 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko, Załącznik do rozporządzenia (DzU 2010, Nr 213, poz. 1397)

²⁾ DJP - duża jednostka przeliczeniowa inwentarza

Roczna produkcja odchodów trzody chlewnej (M_{odp}) w rozpatrywanej fermie to 60 000 Mg [15, 16].

Obecnie jedyną metodą zagospodarowania odchodów powstających w cyklu hodowlanym jest ich magazynowanie na terenie fermy w specjalnym zbiorniku. Gromadzone odchody trzody chlewnej okresowo są wywożone do miejsca, gdzie czekają na rolnicze wykorzystanie bądź unieszkodliwienie (np. składowanie). Docelowo ferma zainteresowana jest budową biogazowni, która zasilalaby w energię fermę i okoliczne gospodarstwa, a powstającą nadwyżkę sprzedawałaby do sieci.

Celem badań jest ocena możliwości wykorzystania odchodów zwierzęcych oraz pozostałości z produkcji rolniczej na potrzeby produkcji biogazu. Analiza została przeprowadzona na podstawie wyników badań własnych i danych literaturowych.

3. Metodyka badań

3.1. Charakterystyka substratów

Głównym substratem do produkcji biogazu w rozpatrywanym przypadku jest gnojowica trzody chlewnej. Analizowana gnojowica nie jest materiałem jednorodnym, dlatego wyniki składu należy traktować jako wskaźniki orientacyjne. W przypadku biogazowni rolniczych zaleca się łączenie odchodów zwierzęcych z roślinami energetycznymi, dlatego wraz z gnojowicą zastosowano odpady produkcji roślinnej - słomę jęczmienną i kiszonkę kukurydzy.

Surowce przeznaczone do badań pochodziły z terenów należących do analizowanej fermy oraz ościennych gospodarstw rolniczych. Próbkę przed analizami zostały rozdrobnione mechanicznie.

3.2. Analiza laboratoryjna

Gnojowicę oraz odpady produkcji roślinnej analizowano powszechnie przyjętymi metodami, zgodnie z obowiązującymi normami (tab. 2).

Tabela 2. Normy, według których przeprowadzono analizy fizyczno-chemiczne

Table 2. Standards for the physicochemical analysis

Właściwości paliwowe	Jednostka	Symbol	Norma
Oznaczanie gęstości nasypowej	kg/m ³	ρ	BN-79-6048-02-06
Oznaczanie wilgotności całkowitej	%	W_c	PN-Z-15008-02:1993P
Oznaczanie straty prażenia odpadów, szlamów i osadów	%	LOI	PN-EN 15169:2011
Oznaczanie zawartości popiołu	%	A	PN-EN 15403:2011E
Oznaczanie zawartości azotu metodą Kjeldahla	%	N	PN-G-04523:1992P
Oznaczanie siarki całkowitej metodą Eschki	%	S	PN-ISO 334:1997P
Oznaczanie: pH, zawartości substancji organicznej, węgla organicznego, azotu, fosforu i potasu	%	OWO, N, P, K	PN-Z-15011-3:2001
Oznaczanie chlorków - metoda miareczkowania azotanem srebra w obecności chromianu jako wskaźnika (metoda Mohra)	g/dm ³	Cl	PN-ISO 9297:1994P

3.3. Metody obliczenia produkcji energii w biogazowni

W celu oszacowania produkcji energii w kogeneracji poczyniono następujące założenia [15, 16]:

- wartość kaloryczna metanu w wytworzonym biogazie (r_{biogaz}) 9,17 kWh/m³ lub 0,03 GJ/m³,
- sprawność agregatu kogeneracyjnego: cieplna ($\eta_c = 43\%$), elektryczna ($\eta_e = 37\%$),
- średni czas pracy agregatu (T) przyjęto na poziomie 8000 h,
- ilość wyprodukowanego ciepła brutto i netto: w praktyce 25÷40% wyprodukowanej energii cieplnej zużywa się na cele procesowe. W obliczeniach przyjęto 30%, gdyż taką wartość zakłada się dla biogazowni efektywnej energetycznie,
- ilość wyprodukowanej energii elektrycznej brutto i netto: w praktyce średnio 9% wyprodukowanej energii elektrycznej jest wykorzystywana na cele procesowe.

Sposób obliczeń pozwalający na oszacowanie produkcji energii cieplnej i elektrycznej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wzory do obliczeń [17-19]

Table 3. Formulas for the calculation [17-19]

Parametr	Symbol	Jednostka	Sposób obliczenia
Roczna produkcja metanu	P_{CH_4}	m ³ /rok	$P_{\text{CH}_4} = M_{\text{odp}} \cdot \frac{\text{s.m.}}{100} \cdot \frac{\text{s.m.o.}}{100} \cdot P_{\text{CH}_4}$
Roczna produkcja energii	E	GJ/rok	$E = P_{\text{CH}_4} \cdot r_{\text{biogaz}}$
Teoretyczna moc cieplna	Q_c	MW	$Q_c = P_{\text{CH}_4} \cdot r_{\text{biogaz}} \cdot \eta_c$
Teoretyczna moc elektryczna	Q_e	MW	$Q_e = P_{\text{CH}_4} \cdot r_{\text{biogaz}} \cdot \eta_e$
Produkcja ciepła brutto	P_c^{brutto}	MWh _c /rok	$P_c^{\text{brutto}} = Q_c \cdot T$
Zużycie ciepła na cele procesowe	Z_c	MWh _c /rok	$Z_c = P_c^{\text{brutto}} \cdot 0,3$
Produkcja ciepła netto	P_c^{netto}	MWh _c /rok	$P_c^{\text{netto}} = P_c^{\text{brutto}} - Z_c$
Produkcja energii elektrycznej brutto	P_e^{brutto}	MWh _e /rok	$P_e^{\text{brutto}} = Q_e \cdot T$
Zużycie energii elektrycznej na cele procesowe	Z_e	MWh _e /rok	$Z_e = P_e^{\text{brutto}} \cdot 0,09$
Produkcja energii elektrycznej netto	P_e^{netto}	MWh _e /rok	$P_e^{\text{netto}} = P_e^{\text{brutto}} - Z_e$

4. Wyniki badań

4.1. Parametry fizyczno-chemiczne substratów

Potencjał energetyczny biogazu uzależniony jest od właściwości substratów, z których został wytworzony. W tabeli 4 zestawiono wyniki analizy fizyczno-chemicznej trzech potencjalnych substratów przeznaczonych do procesu fermentacji.

Tabela 4. Charakterystyka badanych materiałów

Table 4. Characteristics of the tested materials

Parametry	Jednostka	Gnojowica trzody chlewnej	Słoma	Kiszonka kukurydzy
Wilgotność całkowita (W_c)	%	92,00	6,48	64,93
Gęstość nasypowa (ρ_n)	kg/m ³	1015,00	14,33	775,00
pH		7,00	6,20	4,07
Zawartość suchej masy (s.m.)	%	8,00	93,52	35,27
Zawartość części palnych	%	73,02	95,30	97,49
Zawartość popiołu (A)	%	26,98	4,70	2,51
Zawartość suchej masy organicznej (s.m.o.)	%	76,10	88,82	90,76
Potencjał produkcji metanu (P_{CH_4})	m ³ /Mg s.m.o.	301,00	387,50	317,60
Zawartość substancji organicznych (SO)	%	72,60	95,44	84,90
Zawartość substancji mineralnych (SM)	%	27,40	4,56	15,10
Rozkładalne substancje organiczne (RSO)	%	46,91	70,70	82,88
Nierozkładalne substancje organiczne (NSO)	%	25,69	24,74	2,02
Zawartość węgla organicznego (TOC)	%	2,56	33,22	38,95
Zawartość azotu ogólnego (N_{og})	%	0,11	1,48	19,00
Zawartość ortofosforanów (P_2O_5)	%	0,01	3,39	24,47
Zawartość fosforu (P)	%	0,004	1,48	10,67
Zawartość siarki (S)	%	0,20	0,26	0,22
Zawartość chlorków w wyciągu wodnym z odpadów	mgCl/dm ³	90,00	0,21	0,07

Przy zbyt małej wilgotności mieszaniny przeznaczonej do fermentacji wzrost komórek bakterii rozkładających biomasę jest utrudniony. Zawartość wody podczas fermentowania zmienia się, dlatego mówi się o podziale na fermentację mokrą, półsuchą i suchą. Jako mokrą rozumie się fermentację, w której ilość suchej masy nie przekracza 15% i zazwyczaj jest to 8÷12%. Półsuchą określa się wtedy, gdy zawartość suchej masy wynosi około 20%. Kiedy wartość ta zostanie przekroczona, fermentację taką nazywa się suchą. W przypadku zbyt małej ilości wody w masie proces biologicznego rozkładu może zostać zakłócony. Parametr ten zależy od rodzaju rośliny oraz od warunków atmosferycznych, w jakich odbywał się zbiór, lub sposobu magazynowania [20]. Największą wilgotnością całkowitą charakteryzuje się gnojowica trzody chlewnej, na poziomie 92%, a najniższą słoma, której wilgotność całkowita wynosi 6%. Tym samym najwyższą zawartością suchej masy charakteryzuje się słoma - ok. 93%, a najmniejszą gnojowica - 8%.

Na prawidłowy przebieg procesu fermentacji wpływa też odpowiednie przygotowanie substratów. Rozdrobnienie dozowanej masy zwiększa powierzchnię kontaktu, na której mogą rozwijać się bakterie. Poddane analizie substraty są zróżnicowane pod względem gęstości nasypowej, która ma wpływ na mieszanie oraz sposób ich dozowania do komory fermentacyjnej. Wysoką gęstością nasypową

charakteryzowała się gnojowica trzody chlewnej (ok. 1015 kg/m^3) oraz kiszonka kukurydzy (ok. 775 kg/m^3), najmniejszą gęstością nasypową odznaczała się słoma (ok. 14 kg/m^3). Niska gęstość nasypowa słomy podnosić będzie koszty transportu i sprawi, że powierzchnia przeznaczona do jej magazynowania musi być większa niż w przypadku kiszonki kukurydzy.

Najważniejszym utrudnieniem dla efektywnej fermentacji jest wysoka zawartość azotu w formie amonowej oraz substancji mineralnych (popiół). Największą zawartość popiołu oznaczono w gnojowicy trzody chlewnej - 27%, a najmniejszą w kiszonce kukurydzy - 3%.

Nadmiar azotu staje się inhibitorem dla procesu metanogenezy, gdyż spowalnia wzrost bakterii i zakłóca cały proces rozkładu. Może nawet doprowadzić do zniszczenia całych populacji mikroorganizmów i zahamowania fermentacji.

Fermentacja beztlenowa jest procesem, w którym substancje organiczne rozkładane są przez bakterie na związki proste, głównie metan i ditlenek węgla, dlatego im większa zawartość substancji organicznych, tym więcej biogazu zostanie wytworzone. W analizowanych substratach odnotowano duże ilości substancji organicznej, w gnojowicy trzody chlewnej zawartość substancji organicznej wynosi 73%, a w słomie - 95%, natomiast w kiszonce kukurydzy - 85%. Największą zawartością rozkładalnych substancji organicznych (RSO) charakteryzuje się kiszonka kukurydzy - 83%, a najmniejszą gnojowica - 4%.

Do prawidłowego prowadzenia procesu fermentacji konieczne jest zapewnienie bakteriom odpowiednich parametrów fizyczno-chemicznych.

Optymalny zakres pH dla procesu fermentacji powinien zawierać się w wartości $6,8 \div 7,5$, co wpływa na rozpuszczalność związków, a także sprzyja rozwojowi mikroorganizmów [19, 20]. pH kiszonki kukurydzy oraz słomy jest niższe niż $6,8$, lecz po zmieszaniu ich z gnojowicą czy innymi substratami można otrzymać optymalne wartości pH.

Zbyt duże stężenie chlorków może spowodować zahamowanie procesu fermentacji. W gnojowicy trzody chlewnej zawartość chlorków wynosiła 90 mgCl/dm^3 , a w słomie wynosiła $0,21 \text{ mgCl/dm}^3$.

O przebiegu procesu fermentacji decyduje również stosunek C:N. Gdy stosunek ten jest zbyt szeroki, przemiana związków węgla może być niepełna, czego efektem jest zmniejszona produkcja biogazu. W sytuacji odwrotnej, gdy zawartość azotu jest zbyt duża w stosunku do węgla, ilość toksycznego amoniaku może wzrosnąć. Aby proces fermentacji przebiegał prawidłowo, stosunek C:N powinien mieścić się w zakresie $10 \div 30$ [19, 21]. Dla badanych substratów stosunek C:N kształtuje się następująco: dla gnojowicy 23, dla słomy 22, dla kiszonki kukurydzy 2.

Prawidłowe pobierania substancji pokarmowych przez bakterie w komorze fermentacyjnej zachodzi w momencie, gdy stosunek C:N:P:S wynosi $600:15:5:1$, w przypadku analizowanych substratów stosunek C:N:P:S odbiega znacząco od optymalnego. Stosunek C:N:P:S dla badanych substratów kształtuje się następująco:

- dla gnojowicy $13/0,5/0,02/1$,
- dla słomy $128/6/6/1$,
- dla kiszonki kukurydzy $177/89/48/1$.

4.2. Produkcja energii w biogazowni

Największe możliwości pozyskania biogazu w Polsce mają gospodarstwa specjalizujące się w produkcji zwierzęcej powyżej 100 DJP, ale nie przekreśla to możliwości budowy biogazowni przez gospodarstwa o mniejszej liczbie zwierząt.

Potencjał produkcji metanu z gnojowicy trzody chlewnej dla rozpatrywanej fermy szacuje się na poziomie ok. 1 099 492 m³/rok, ze słomy rzędu 5 188 682 m³/rok, a z kiszonki kukurydzy na poziomie 1 638 892 m³/rok (tab. 5). Zakładając, że wybrany kogenerator umożliwi produkcję energii elektrycznej ze sprawnością 37%, a energii cieplnej na poziomie 43%, obliczono ilości energii, które podano w tabeli 5.

Tabela 5. Kalkulacja możliwej do pozyskania energii elektrycznej i ciepła w procesie fermentacji
Table 5. Calculation of electrical power and heat that can be obtained in the process of fermentation

Surowce do fermentacji	Parametry									
	P _{CH₄}	E	Q _c	Q _e	P _{c brutto}	Z _c	P _{c netto}	P _{e brutto}	Z _e	P _{e netto}
	mln m ³ /rok	TJ/rok	MW		tys. MWh/rok					
Gnojowica	1,09	3,29	0,5	0,5	4,03	1,21	2,82	3,03	0,27	2,75
Słoma	5,19	15,56	2,6	2,2	19,03	5,71	13,32	14,27	1,28	12,98
Kiszonka kukurydzy	1,64	4,92	0,8	0,7	6,01	1,80	4,21	4,51	0,40	4,10

Tabela 6. Kalkulacja możliwej do pozyskania energii elektrycznej i ciepła w procesie kofermentacji

Table 6. Calculation of electrical power and heat that can be obtained in the process of co-fermentation

Udział substratów %			Parametry									
G*	S*	K*	P _{CH₄}	E	Q _c	Q _e	P _{c brutto}	Z _c	P _{c netto}	P _{e brutto}	Z _e	P _{e netto}
			mln m ³ /rok	TJ/rok	MW		tys. MWh/rok					
80	20	0	1,92	5,75	0,9	0,8	7,03	2,11	4,92	5,28	0,47	4,80
70	30	0	2,33	6,98	1,1	1,0	8,53	2,56	5,97	6,40	0,57	5,82
50	25	25	2,26	6,77	1,1	1,0	8,27	2,48	5,79	6,21	0,56	5,65
50	50	0	3,14	9,43	1,5	1,3	11,53	3,46	8,07	8,65	0,78	7,87
40	30	30	2,49	7,46	1,2	1,1	9,13	2,74	6,38	6,85	0,62	6,23
40	60	0	3,55	10,66	1,8	1,5	13,03	3,91	9,12	9,77	0,88	8,89

*G - gnojowica, S - słoma, K - kiszonka kukurydzy

Na podstawie przeprowadzonych rozważań wybrano biogazownię, która będzie mogła produkować energię elektryczną i ciepłą dzięki zastosowaniu procesu kogeneracji (tab. 6). W biogazowni będzie można zastosować kogenerator o mocy

elektrycznej 1,5 MW i ciepłej 1,8 MW. Szacuje się, że zastosowanie takiego rozwiązania pozwoli na wyprodukowanie ok. 9775,8 MWh energii elektrycznej i ok. 13 032 MWh energii ciepłej rocznie.

Podsumowanie

Biogazownie o małej mocy idealnie nadają się do efektywnego zaopatrzenia w energię obszarów wiejskich. Takie rozwiązanie charakteryzuje się niskimi stratami na przesył, brakiem konieczności szeroko zakrojonej rozbudowy istniejących sieci oraz możliwością wykorzystania powstałego ciepła na danym obszarze.

Należy podkreślić, że biogazownie w przeciwieństwie do elektrowni wiatrowych, słonecznych czy wodnych mogą produkować energię niemal bez przerwy, na stałym poziomie, przy zapewnieniu stałego dostępu surowców. Na tej podstawie można je uznać za stabilne źródło energii.

Dodatnim aspektem środowiskowym z zagospodarowania odpadów pochodzenia rolniczego w procesie fermentacji metanowej jest uniknięcie emisji metanu do powietrza, która ma niewątpliwie miejsce w czasie ich przechowywania przed unieszkodliwianiem.

Zagospodarowanie pozostałości po fermentacji stwarza mniej problemów w porównaniu z odchodami świeżymi, dzięki zmianie ich właściwości.

Otrzymywany po procesie fermentacji nawóz zawiera pierwiastki biogenne w formie łatwiej przyswajalnej dla roślin oraz charakteryzujące się zredukowaną odorowością, jednocześnie unieszkodliwianiu ulegają szkodliwe dla roślin substancje. Otrzymany nawóz można będzie wykorzystać do nawożenia pól należących do fermy, jak również okolicznych gospodarstw rolnych.

Należy pamiętać, że biogaz pozyskiwany z odchodów trzody chlewnej nie jest energią darmową, ponieważ na jego koszt mają wpływ nakłady poniesione na budowę i eksploatację biogazowni, lecz dla gospodarstw, które starają się o własne biogazownie rolnicze, istotnym faktem jest możliwość ubiegania się o dofinansowania, które niewątpliwie mogą wesprzeć powstającą inwestycję.

Istotną zaletą budowy biogazowni są powstające wraz z nią nowe miejsca pracy dla lokalnej społeczności przy produkcji substratów oraz budowie i obsłudze obiektu.

Literatura

- [1] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.
- [2] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, DzU z 2013, poz. 21.
- [3] Gharfalkara M., Courta R., Campbella C., Alib Z., Hilliera G., Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC, Waste Management 2015, 39, 305-313.
- [4] Smith S.A., Hughes E., Coats E.R., Brinkman C.K., McDonald A.G., Harper J.R., Feris K., Newby D., Toward sustainable dairy waste utilization: enhanced VFA and biogas synthesis via upcycling algal biomass cultured on waste effluent, Journal of Chemical Technology and Biotechnology 2016, 91, 1, 113-121.

- [5] Ministerstwo Gospodarki, Polityka energetyczna Polski do 2030 roku, Warszawa, 10 listopada 2009 r. Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dnia 10 listopada 2009 r.
- [6] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, DzU 2015, poz. 478.
- [7] Rejestr wytwórców biogazu rolniczego (dostęp: 7.04.2016 r.).
- [8] <http://www.gospodarzenergia.pl/mikrobiogazownie> (dostęp: 20.06.2016 r.).
- [9] Optimal use of biogas from waste streams An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020.
- [10] <http://www.bioenergyfarm.eu/pl/dobrze-skalkulowana-wielkosc-instalacji/> (dostęp: 20.06.2016 r.).
- [11] Zhou H., Löffler D., Kranert M., Model-based predictions of anaerobic digestion of agricultural substrates for biogas production, *Bioresource Technology* 2011, 102, 10819-10828.
- [12] Ministerstwo Gospodarki, Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010-2020, Warszawa 2010.
- [13] Ustawa z dnia 8 stycznia 2010 r. o zmianie ustawy - Prawo energetyczne oraz o zmianie niektórych innych ustaw, DzU 2010, Nr 21, poz. 104.
- [14] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 24 sierpnia 2011 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku potwierdzania danych dotyczących wytwarzanego biogazu rolniczego wprowadzonego do sieci dystrybucyjnej gazowej, DzU 2011, Nr 187, poz. 1117.
- [15] Materiały wewnętrzne firmy Danish Farming Consultants Sp. z o.o. w Rzeczycach.
- [16] Czop M., Potencjał biogeny odpadów z hodowli trzody chlewnej, *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 2011, 13, 3, 53-64.
- [17] Leitfaden Biogas Von der Gewinnung zur Nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Gülzow 2010.
- [18] Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Surowce do produkcji biogazu - uproszczona metoda obliczenia wydajności biogazowni rolniczej, *Czysta Energia* 2010, 1, 25-27.
- [19] Gołaszewski J., Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce, *Postępy Nauk Rolniczych* 2011, 2, 69-94.
- [20] www.biogazownie.fwie.pl (dostęp: 20.06.2016 r.).
- [21] Biogaz Produkcja, wykorzystanie, Institut für Energetik und Umwelt GmbH.

Silesian University of Technology, Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Technologies and Installations for Waste Management
ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice
e-mail: Monika.Czop@polsl.pl, ewelina.klapcia@onet.pl

Streszczenie

Zmiany zachodzące na rynku energii zmuszają do podejmowania nowych rozwiązań, mających na celu poszukiwanie jej źródeł dla zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego i samowystarczalności w tej dziedzinie gospodarki. Kierując się tymi kryteriami, Rada Ministrów w 2010 roku przyjęła dokument pt. „Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010-2020”, w którym założono powstanie średnio jednej biogazowni o mocy 1 MW w każdej gminie. Przyjęte założenie spowodowałoby powstanie około 2 tysięcy obiektów o mocy 2 tysięcy MWe. Potencjał teoretyczny produkcji biogazu rolniczego w Polsce na bazie odchodów zwierzęcych (gnojowica i obornik) oszacowano na ponad 3 mln m³. W artykule przedstawiono wyniki badań fizyczno-chemicznych: słomy jęczmiennej, kiszonki kukurydzy i odchodów trzody chlewnej.

Słowa kluczowe: odpady rolnicze, biomasa, odchody trzody chlewnej, biogaz, czysta energia