

JUSTYNA KWAŚNY*, MARCIN BANACH, ZYGMUNT KOWALSKI**

PRZEGLĄD TECHNOLOGII PRODUKCJI BIOGAZU RÓŻNEGO POCHODZENIA

TECHNOLOGIES OF BIOGAS PRODUCTION FROM DIFFERENT SOURCES – A REVIEW

Streszczenie

Biogaz powstaje w procesie fermentacji metanowej biomasy. Pod względem chemicznym jest mieszaniną głównie metanu, tlenku węgla, siarkowodoru oraz wody w postaci pary wodnej. Stężenia tych gazów różnią się w zależności od rodzaju substratów procesu fermentacji, które wpływają na skład chemiczny biogazu. W artykule dokonano charakterystyki biomasy poddawanej przetwarzaniu beztlenowemu, a także omówiono wybrane technologie produkcji biogazu różnego pochodzenia – z oczyszczalni ścieków, wysypiskowego i rolniczego.

Słowa kluczowe: biogaz, fermentacja metanowa, biomasa, odnawialne źródła energii

Abstract

Biogas is produced in the anaerobic digestion of biomass. It is a mixture of methane (mainly), carbon monoxide, hydrogen sulfide and water in vapor form. The concentrations of these gases vary depending on the type of fermentation process substrates, which affect the chemical composition of biogas. The paper presents the characteristics of the biomass subjected to anaerobic processing. Also selected technologies of biogas production from different origin – sewage treatment plants, landfill and agricultural are discussed.

Keywords: biogas, methane fermentation, biomass, renewable energy sources

* Mgr inż. Justyna Kwaśny, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Marcin Banach, prof. dr hab. inż. Zygmunt Kowalski, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym zwiększa się zapotrzebowanie na energię. Według powszechnych opinii tradycyjne zasoby energetyczne, głównie paliwa kopalne (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny) wyczerpują się, a ich użycie powoduje wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego głównie gazami cieplarnianymi. Dlatego też na znaczeniu zyskują odnawialne źródła energii (OZE), które są nieszkodliwe dla otaczającego nas świata. Dużą uwagę do ochrony środowiska oraz kwestii energetycznych przywiązuje Unia Europejska. Kładzie ona nacisk na zwiększenie udziału energii z OZE w ogólnym zużyciu energii. W krajach UE kwestie energetyczne regulowane są odpowiednimi dyrektywami i tzw. Zieloną i Białą Księgą [1]. Natomiast w Polsce dodatkowo obowiązuje Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne, (Dz.U. z 2006 r. Nr 89, poz. 625 z późn. zm.), Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 14 sierpnia 2008 r. (Dz.U. Nr 156, poz. 969), a także Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dz.U. Nr 169, poz. 1199) wraz z odpowiednimi przepisami wykonawczymi [1].

W celu rozwoju energetyki odnawialnej w kraju postanowiono zwiększyć wykorzystanie zasobów energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 roku do 15%. Natomiast przyjęto, że w 2010 roku udział energii elektrycznej wytwarzanej z OZE w krajowym zużyciu wynosić będzie 7,5% w odniesieniu do energii elektrycznej [1].

Obecnie w Polsce w największym stopniu energię ze źródeł odnawialnych wytwarza się z biomasy stałej. Według danych GUS [1] w 2008 roku udział energii z biomasy stałej w odniesieniu do całkowitej energii z OZE wynosił 87,7%. Był on niższy w porównaniu z rokiem 2005 o 3,9%, natomiast wzrósł udział energii wiatru (o 1%), a także wytworzono większą ilość biogazu i biopaliw, odpowiednio o 0,6% i 2,9% [1]. Według Głodek i współpracowników [2] potencjał biogazu, jakim dysponuje nasze państwo, znacznie przekracza zużycie krajowe gazu ziemnego. Fakt ten tłumaczy wzrastające zainteresowanie produkcją biogazu w Polsce, co potwierdzają przedstawione wcześniej dane statystyczne.

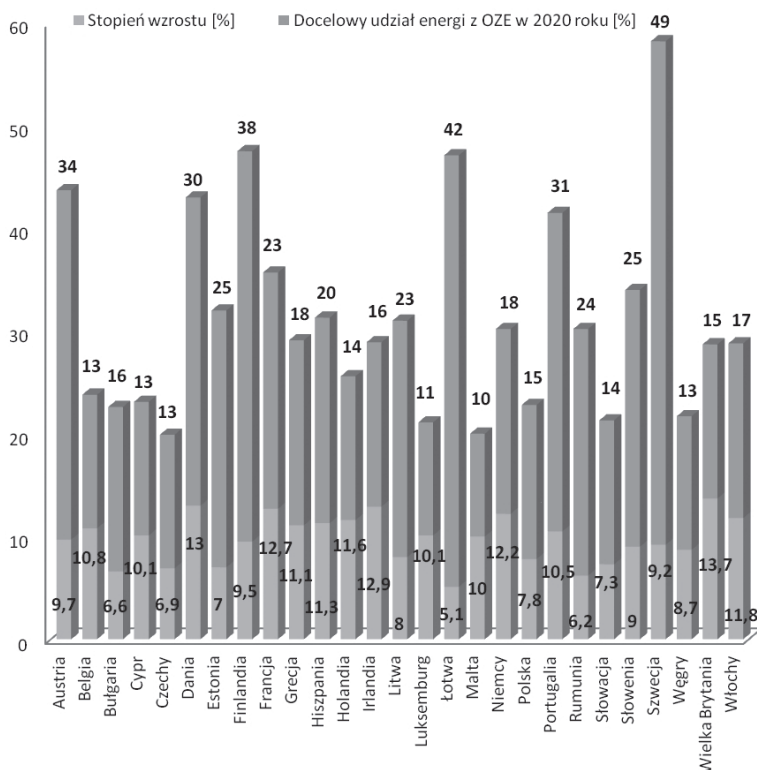
2. Energia z odnawialnych źródeł energii (OZE)

Odnawialne źródła energii stanowią grupę powszechnie dostępnych niekopalnych źródeł, powstających samoistnie w powtarzających się naturalnych procesach przyrodniczych. Charakteryzują się one brakiem negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Energia wytwarzana z OZE dzieli się na energię elektryczną i ciepłą, przy czym pochodzą one od elektrowni wodnych i wiatrowych, słonecznych ogniw fotowoltaicznych oraz słonecznych kolektorów do wytwarzania ciepła, a także źródeł geotermalnych i wytwarzających energię z biomasy, w tym wytwarzających energię z biogazu [2].

Wytwarzanie energii z OZE przysparza wiele korzyści. Przede wszystkim, w aspekcie globalnym sprzyja ochronie środowiska, gdyż przyczynia się do obniżenia emisji gazów cieplarnianych, głównie CO₂ i CH₄. Przetwarzanie biomasy wiąże się również z redukcją emisji SO₂ oraz tlenków azotu (NO_x) i tlenku węgla. Dodatkowo takie zagospodarowanie biomasy sprzyja redukcji powierzchni wysypisk.

Na rysunku 1 pokazano planowany stopień wzrostu udziału energii z OZE (w stosunku do końcowego zużycia energii brutto) od 2005 rok 2020 roku oraz docelowy udział tej energii w 2020 roku.



Rys. 1. Docelowy udział energii z OZE w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 roku oraz planowany stopień wzrostu udziału energii z OZE od 2005 do 2020 roku w Europie [1]

Fig. 1. Target for RES share in gross final energy consumption in 2020 and the planned rate of increase of RES share from 2005 to 2020 in Europe [1]

Instalacje do pozyskiwania energii z OZE mają zazwyczaj charakter lokalny, w związku z tym można twierdzić, iż energetyka odnawialna sprzyja regionalnemu rozwojowi gospodarczemu oraz przyczynia się do tworzenia nowych miejsc pracy.

3. Biogaz i jego powstawanie

Biogaz powstaje w wyniku przetworzenia biomasy, która stanowi jedno z podstawowych odnawialnych źródeł energii. Pod względem chemicznym składa się głównie z metanu i dwutlenku węgla, aczkolwiek jego kompozycja w dużej mierze zależy od rodzaju surowców, z których jest pozyskiwany. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny biogazu pozyskiwanego z odpadów z gospodarstw domowych, osadów z oczyszczalni ścieków, odpadów rolniczych oraz odpadów z przemysłu rolno-spożywczego.

Skład chemiczny biogazu pozyskiwanego z różnego rodzaju surowców [3]

Składnik	Jednostka	Odpady z gospodarstw domowych	Osad z oczyszczalni ścieków	Odpady rolniczych	Odpady z przemysłu rolno-spożywczego
CH ₄	[%] obj.	50–60	60–75	60–75	68
CO ₂		34–38	19–33	19–33	26
N ₂		0–5	0–1	0–1	–
O ₂		0–1	< 0,5	< 0,5	–
H ₂ O	[%] obj. (w 40°C)	6	6	6	6
H ₂ S	[mg/m ³]	100–900	1000–4000	3000–10 000	100
NH ₃		–	–	50–100	400
Związki aromatyczne		0–200	–	–	–
Związki chlorowcoorganiczne lub fluoroorganiczne		100–800	–	–	–

Biogaz można podzielić ze względu na sposób pozyskiwania, np. wyróżnia się gaz wysypiskowy, uzyskiwany w wyniku fermentacji odpadów na składowiskach, a także gaz z osadów ściekowych, wytwarzany w wyniku beztlenowej fermentacji szlamu kanalizacyjnego. Wyodrębnia się również biogaz rolniczy, który uzyskuje się w procesie beztlenowej fermentacji biomasy pochodzącej z upraw energetycznych, pozostałości z produkcji roślinnej i odchodów zwierzęcych lub pochodzącej z odpadów w rzeźniach, browarach i pozostałych branżach żywnościowych [1].

Jak wcześniej wspomniano, biogaz powstaje w procesie fermentacji metanowej [4]. Jest to proces beztlenowy, który obejmuje cztery etapy: hydrolizę, kwasogenezę, octanogenezę i metanogenezę. W pierwszym etapie zachodzi rozkład nierozpuszczalnych związków organicznych, takich jak białka, tłuszcze i węglowodany. W rezultacie powstają aminokwasy, cukry proste, alkohole wielowodorotlenowe i kwasy tłuszczowe. Proces odbywa się przy udziale enzymów zewnątrzkomórkowych. W fazie acidogennej powstają lotne kwasy tłuszczowe, alkohol metylowy i etanol, aldehydy oraz CO₂ i H₂, a także octany. Powstałe kwasy (mrówkowy, octowy) oraz metanol, CO₂ i H₂ mogą być już w tym etapie wykorzystane przez bakterie metanowe w procesie metanogenezy. Natomiast bakterie acetogenne przetwarzają etanol i lotne kwasy tłuszczowe do CO₂ i H₂ w następnym etapie – octanogenezie. Ich aktywność ma wpływ na kolejny etap procesu. W wyniku zahamowania wzrostu tych mikroorganizmów, dochodzi do kumulacji lotnych kwasów tłuszczowych, co z kolei prowadzi do spowolnienia lub zatrzymania wzrostu bakterii metanowych. Odpowiedzialne są one za generowanie metanu z octanów lub alkoholi, a także z CO₂ w wyniku jego redukcji wodorem [2, 5, 6].

Przebieg fermentacji metanowej zależy od wielu czynników – temperatury, odczynu fermentowanego materiału, zawartości składników pokarmowych (dokładniej stosunku C/N) oraz od mieszania. Ponieważ bakterie metanowe są bardziej wrażliwe na zmiany temperatury i odczynu pH niż bakterie acetogenne, proces fermentacji prowadzi się w warunkach dogodniejszych dla ich rozwoju i aktywności [2, 7]. W tabeli 2 przedstawiono parametry prowadzenia procesu fermentacji metanowej.

Tabela 2

Parametry procesu fermentacji metanowej [2, 7]

Parametr	Optymalne warunki procesu	Zakres aktywności bakterii	Warunki najczęściej utrzymywane	Ewentualne utrudnienia
Temperatura [°C]	20–25	psychofilnych	30–40	Możliwa konieczność higienizacji, w celu usunięcia bakterii chorobotwórczych – w tym celu prowadzenie procesu z użyciem bakterii termofilnych. Proces prowadzony w wysokiej temperaturze jest bardziej wrażliwy na zakłócenia
	35–37	mezofilnych		
	55–60	termofilnych		
Odczyn pH	4,5–6,3	hydrolizujących i kwasotwórczych	6,5–7,5	Nadmierna koncentracja lotnych kwasów tłuszczowych powoduje obniżenie pH
	6,8–7,5	acetogennych i metanogennych		
Stosunek C/N	10–30	odpowiedni dla wszystkich rodzajów bakterii w procesie	10–30	Nadmierna ilość związków azotu w substratach procesu, prowadzi do jego akumulacji w postaci NH_3 , który przy wysokim stężeniu jest toksyczny dla bakterii metanogennych

Aby proces fermentacji metanowej przebiegał z wysoką wydajnością produkcji biogazu, konieczne jest mieszanie substratów w pryzmach fermentacyjnych. Pozwala to utrzymać jednakową temperaturę substratów, zapewnia jednorodny przebieg procesów w całej objętości pryzmy, a także jednolitą konsystencję materiału. Przede wszystkim mieszanie sprawia, że bakterie i podłoże mają większy kontakt. Umożliwia również łatwiejsze odgazowanie i zmniejszenie zawartości rozpuszczonego CO_2 , a także wydzielenie wody nadosadowej (międzycząsteczkowej), przez co dochodzi do zagęszczenia biomasy. Jednakże, zbyt intensywne mieszanie może obniżyć wydajność procesu, dlatego zazwyczaj prowadzi się

je w sposób okresowy, stosując wieloobrotowe mieszadła o małej sile tnącej [7]. Kovacs i współpracownicy [8] wykazali, że aby zwiększyć wydajność produkcji biogazu w warunkach termofilnych, biomasę zawierającą mikroorganizmy acetogenne, metanogenne i zdolne do degradowania polimerów należy zaszczerpić kulturami bakterii termofilnych, acetogennych i wytwarzających wodór, np. *Caldicellulosiruptor saccharolyticus*. Dodatek bakterii odbywał się przed procesem fermentacji lub w jego trakcie. Proponowana metoda skutkowała również wzrostem zawartości metanu w uzyskanym biogazie [8].

4. Surowce do produkcji biogazu

Potencjał energetyczny biogazu zależy głównie od substratów, z których został wytworzony [3]. Przy pozyskiwaniu biogazu rolniczego bardzo często stosuje się gnojowicę jako materiał przetwarzany. Należy jednak zauważyć, iż jest ona substratem o niskiej wydajności biogazu: od 290 do 550 dm³ CH₄/kg materii organicznej, gdyż w dużym stopniu składa się z wody. Aby zwiększyć efektywność produkcji biogazu z gnojowicy, poddaje się ją działaniu wysokich temperatur oraz zmienia się jej odczyn. Carrère i współpracownicy [9] modyfikacje termiczne prowadzili w zakresie temperatur od 70 do 190°C, w odpowiedniej aparaturze i przez określony czas. W niższych temperaturach (100°C) proces trwał dłużej – ok. 3 godziny i prowadzony był w szklanym reaktorze wyposażonym w mieszadło magnetyczne. Podczas gdy w przypadku wyższych temperatur stosowano reaktor Zipperclave, a proces trwał 20 minut. Carrère i współpracownicy [9] przeprowadzali również modyfikacje chemiczno-termiczne, które polegały na działaniu wysokich temperatur i zmianie odczynu gnojowicy (pH = 10 lub 12). Następnie określali tzw. Biochemiczny Potencjał Produkcji Metanu (BMP). Jego najwyższą wartość (nawet do 48%), obserwowano w temperaturze 190°C. Jednak optymalnie modyfikacje prowadzi się w temperaturach od 135°C do 190°C [9]. Bougrier i współpracownicy podkreślają również, że podczas ogrzewania w temperaturach bliskich 190°C zachodzi termiczna hydroliza gnojowicy [10]. Opierając się na badaniach Carrèrego i współpracowników [9] można stwierdzić, iż aby zwiększyć efektywność produkcji biogazu z gnojowicy, należy ją ogrzać lub najpierw zmodyfikować jej pH do 10 i ogrzać, zanim podda się ją procesowi fermentacji.

Wydajność produkcji metanu z biomasy, zwiększa się również poprzez odpowiedni dobór substratów. Kowalczyk-Juško [11] jako źródło biogazu zastosowała gnojowicę świńską, która stanowiła materiał bazowy, natomiast jako tzw. kosubstraty zastosowano kiszonkę z kukurydzy, odpady owocowe w formie wytlóków oraz obornik bydlęcy. Największą efektywnością ekonomiczną charakteryzował się proces fermentacji mieszanki gnojowicy i odpadów owocowych. Natomiast wydajność produkcji biogazu z tych substratów wyniosła odpowiednio 18,0 i 112,7 m³/h. W przypadku obornika bydlęcego wydajność biogazu wyniosła 35,3 m³/h. Zadowalającą efektywność procesu stwierdzono również przy fermentacji kiszonki kukurydzianej. Wydajność produkcji biogazu z kiszonki z kukurydzy wyniosła 132,7 m³/h i była najwyższa spośród analizowanych przypadków. Jednak wysoka cena tego substratu sprawia, że proces jego fermentacji jest nieopłacalny [11]. Charakterystykę wybranych substratów procesu fermentacji beztlenowej, z uwzględnieniem potencjału produkcji biogazu, przedstawiono w tabeli 3.

Potencjał produkcyjny biogazu dla wybranych substratów procesu fermentacji metanowej [7]

Rodzaj materiału	Charakterystyka		Wydajność biogazu	
	zawartość suchej masy [%]	zawartość substancji organicznej w suchej masie [%]	dm ³ /kg suchej substancji organicznej	zawartość CH ₄ w biogazie [%]
Gnojowica bydłęca	8	86	280	55
Gnojowica świńska	6	80	400	60
Obornik	25	80	450	55
Kiszonka z kukurydzy	32	95	600	52
Kiszonka z całych roślin zbożowych	40	95	520	53
Rozdrobnione kolby kukurydzy	65	98	680	55
Ziarno zboża	86	98	700	55

5. Podział technologii produkcji biogazu

Wybór technologii produkcji biogazu zależy przede wszystkim od rodzaju przetwarzanych substratów. Dlatego też rozwiązania technologiczne można podzielić według określonych kryteriów, do których zaliczamy zawartość suchej masy w komorze fermentacyjnej, temperaturę procesu, ilość stopni procesu, stopień rozdzielania poszczególnych faz procesu fermentacji oraz sposób dozowania substratów. W tabeli 4 przedstawiono klasyfikację technologii produkcji biogazu według wymienionych kryteriów.

Pierwsza przemysłowa instalacja do produkcji biogazu powstała w 1859 roku w Bombaju (Indie), natomiast w Polsce w 1928 roku w Poznaniu, a pozyskiwany biogaz pochodził z przetwarzania osadów ściekowych [13]. Obecnie wyróżnia się dwa typy instalacji biogazowych:

- Biogazownie scentralizowane, które charakteryzują się dużymi gabarytami, a dzienny wsad surowca poddawanego fermentacji wynosi od 50 do 500 ton substratów. Znajdują się one w pobliżu ferm hodowlanych;
- Biogazownie indywidualne o mniejszych powierzchniach i rozmiarach komór fermentacyjnych.

Rozmiary instalacji do produkcji biogazu (głównie agregatów i zbiorników) zależą od ilości substratów oraz rodzaju materiału wsadowego. Aczkolwiek, bez względu na to, każda biogazownia składa się z kilku podstawowych segmentów, takich jak:

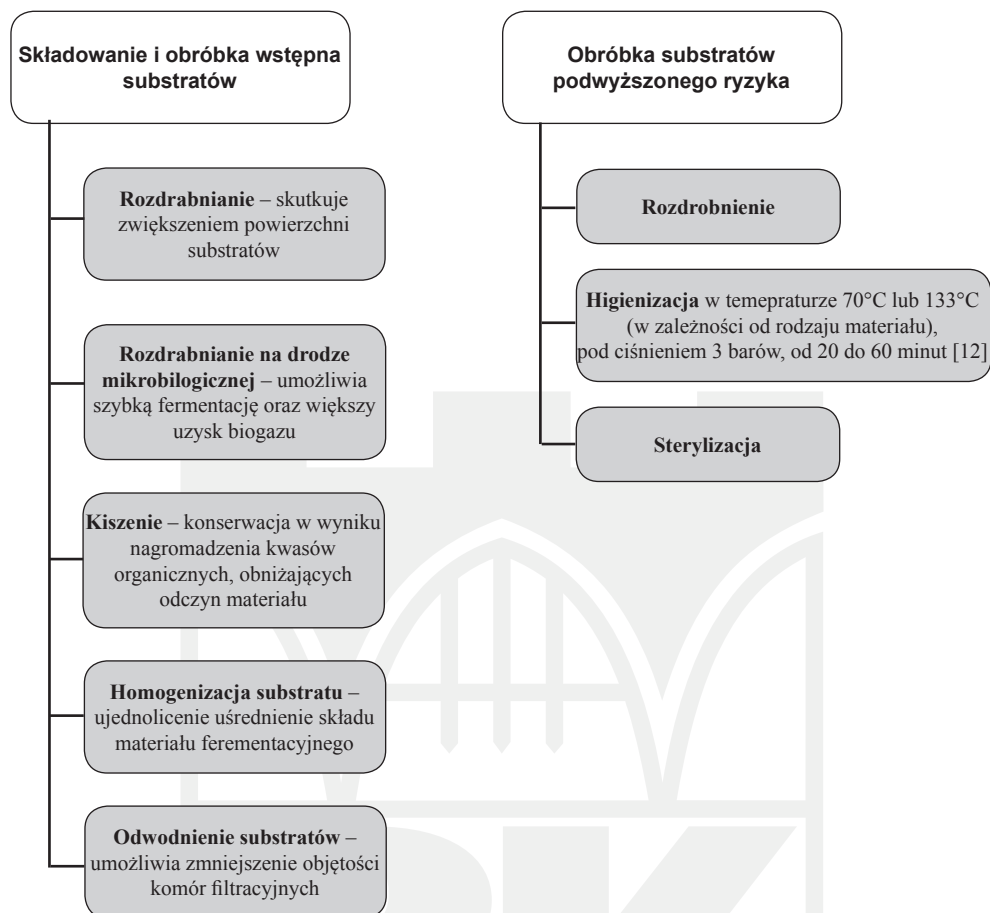
- *Segment przechowywania i obróbki wstępnej materiału wsadowego*, w którym wyróżnia się m.in. zbiorniki surowca, pompy, macerator, układ do higienizacji surowca oraz do przechowywania i odprowadzania materiału. Na tym etapie procesu zachodzi kizenszenie surowców roślinnych, w celu ich rozdrobnienia i konserwacji, a także wstępne-go rozkładu materii organicznej i zmniejszenia flory mikroorganizmów. W przypadku

składowania odpadów stałych o większej uciążliwości zapachowej istnieje konieczność wyposażenia hal magazynowych w filtry biologiczne lub z węglem aktywnym. Natomiast substraty płynne (np. gnojowicę) przechowuje się w zbiornikach magazynowych wyposażonych w mieszadła, instalację grzewczą, system uzdatniania powietrza odlotowego, a w razie konieczności zawierających rozdrabniacze. Charakterystykę procesów zachodzących podczas przechowywania materiału wsadowego różnego typu przedstawiono na rysunku 2;

Tabela 4

Klasyfikacja technologii produkcji biogazu [12]

Kryterium	Rodzaj technologii	Cechy charakterystyczne
Temperatura procesu	mezofilna	35–37, najczęściej stosowana
	termofilna	55–60, stosowana rzadziej, często w przypadkach przetwarzania substratów podwyższonego ryzyka, np. odpadów poubojowych lub odchodów zwierzęcych. Proces prowadzony w tych warunkach jest bardziej wrażliwy na zakłócenia, ale przebiega z większą wydajnością
Zawartość suchej masy w komorze fermentacyjnej	fermentacja mokra	zawartość suchej masy w substratach procesu nie przekracza 15%, fermentowany materiał ma postać płynną
	fermentacja sucha	substraty o konsystencji stałej, charakteryzujące się wysoką zawartością suchej masy
Ilość stopni procesu	jednostopniowa	w instalacji znajduje się jedna komora fermentacyjna
	wielostopniowa	w instalacji znajduje się kilka połączonych szeregowo komór do fermentacji
Stopień rozdzielenia faz procesu fermentacji	jednofazowa	hydroliza substratów i etap metanogenezy zachodzą w jednym reaktorze z równą intensywnością
	wielofazowa	hydroliza substratów i etap metanogenezy zachodzą w oddzielnych reaktorach
Sposób dozowania substratów	ciągły	dozowanie substratów równomiernie w sposób ciągły, co umożliwia stały stopień produkcji biogazu
	okresowy	napelnienie komory fermentacyjnej jednorazowo i jej opróżnienie po procesie. Stopień produkcji biogazu wyższy w początkowym okresie procesu, malejący wraz z upływem czasu



Rys. 2. Charakterystyka procesów zachodzących podczas przechowywania i obróbki materiału wsadowego różnego pochodzenia

Fig. 2. Characteristics of the processes taking place during storage and processing of feed material of various origin

- *Komora fermentacyjna*, produkowana z różnych materiałów (np. beton, tworzywa sztuczne, blacha stalowa), może być wyposażona w mieszadło, detektor i wylapywacz piany oraz miernik poziomu cieczy w komorze;
- *System ogrzewania*, umożliwiający utrzymanie odpowiedniej temperatury, składający się głównie z wymiennika ciepła;
- *Systemu instalacji gazowej*, służącej do odbioru i przechowywania wytworzonego biogazu, a także do jego oczyszczania, np. na skutek odwadniania lub w wyniku adsorpcji zanieczyszczeń za pomocą odpowiednich filtrów;
- *Segmentu przechowywania lub przetwarzania pozostałości pofermentacyjnej* – zbiorniki na pozostałość oraz instalacja do obróbki przefermentowanego materiału na nawóz [2].

6. Charakterystyka technologii produkcji biogazu wysypiskowego

Biogaz wysypiskowy otrzymuje się z odpadów pochodzenia organicznego składowanych na wysypiskach w postaci sprasowanych hałd, wewnątrz których panują warunki beztlenowe i mezofile. Skład chemiczny wytwarzanego gazu zależy od sposobu jego odprowadzania, a także szczelności złoża przetwarzanych materiałów. W przypadku naturalnego wypływu gazu ze złoża otrzymuje się produkt o największej zawartości CH_4 (60–65%), ale także (co jest niekorzystne) o wysokiej zawartości związków siarki, chloru i halogenopochodnych węglowodorów aromatycznych. Gaz o zawartości metanu 45–50% otrzymuje się przy stosowaniu odsysania i dobrego uszczelniania hałdy, natomiast biogaz o najmniejszej zawartości metanu (25–45%) uzyskuje się podczas odsysania hałdy źle uszczelnionej [14]. W tabeli 5 przedstawiono ilość energii wyprodukowanej w Polsce w latach 2001–2009 z biogazu różnego pochodzenia, w tym z biogazu wysypiskowego.

Tabela 5

Produkcja energii elektrycznej z biogazu [GWh] [1]

Rodzaj biogazu	Rok								
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Z wysypisk odpadów	42,0	48,0	53,0	63,3	75,3	92,0	113,6	148,4	174,8
Z oczyszczalni ścieków	–	–	2,0	18,1	35,4	66,7	79,5	94,9	122,7
Rolniczy	–	–	1,0	0,8	0,6	1,5	2,1	8,3	21,7
Ogółem	42,0	48,0	56,0	82,2	111,3	160,1	195,2	251,6	319,2

Technologiami produkcji wartościowego (pod względem zawartości CH_4 i zanieczyszczeń) biogazu wysypiskowego mogą pochwalić się kraje, takie jak: Niemcy, Belgia, Szwecja, Francja i Finlandia. W Niemczech sprawnie działają instalacje wykorzystujące technologię BTA i Rottweil. Według **BTA** substancje organiczne zawarte w nieprzesortowanych odpadach komunalnych, ługuje się w podwyższonej temperaturze. Natomiast uzyskany po fermentacji roztwór, kierowany jest do ponownego ługowania i następnej fermentacji. Czynności te powtarza się od 3 do 5 razy. Według technologii **Rottweil** biogaz produkowany jest z dokładnie wyselekcjonowanych śmieci z gospodarstw domowych, a także z odpadów gastronomicznych, kuchennych i ogrodniczych dostarczanych przez duże jednostki. Przetworzony w wyniku fermentacji materiał, staje się bogatym w substancje odżywcze nawozem organicznym, wolnym od metali ciężkich [14].

W Belgii biogaz wytwarzany jest m.in. według technologii **Dranco**, stanowiącej typ fermentacji suchej. Fermentacja odbywa się w reaktorach w temperaturze 55°C, jako materiał wsadowy stosowane są odpady stałe lub pozostałości z fermentacji wg technologii BTA, które najpierw poddaje się ekstrakcji, a następnie odsącza na prasie [14].

Według pomysłu szwedzkiego (technologia **SWECO**) gaz wysypiskowy uzyskuje się w wyniku fermentacji beztlenowej zachodzącej w pryzmach energetycznych ze szczelnym dnem i ścianami bocznymi. W warstwie torfu umieszcza się rozdrobnione odpady, a nad nimi rozciąga się system rurociągów ssących, po czym wszystko przykrywa się gliną [14].

Według technologii **WABIO** (Finlandia) śmieci poddaje się wstępnej selekcji, gdzie odziera się wielkogabarytowe odpady metalowe, betonowe, kamienne oraz pozostałości sprzętu RTV lub AGD. Pozostałe odpady mieli się i miesza z gorącą wodą. Następnie w wyniku sedymentacji rozdziela się osad nieaktywny biologicznie, a otrzymaną zawiesinę związków organicznych miesza się z odpadami z oczyszczalni ścieków (osadem biologicznie aktywnym). Proces fermentacji przebiega w bioreaktorze przez ok. 23 dni, po czym osad poddaje się higienizacji (30 dni, 70°C), filtracji i stabilizacji biologicznej, w celu otrzymania nawozu organicznego [14].

W Polsce gaz wysypiskowy uzyskuje się z 20 instalacji, podczas gdy liczba składowisk odpadów komunalnych wynosi ok. 800. Biogazownie wyposażone w agregaty prądotwórcze znajdują się w Bydgoszczy, Gdańsku, Gdyni, Poznaniu, Grudziądzu, Koszalinie, a także Sosnowcu, Olsztynie, Katowicach, Łubnej i w Krakowie („Barycz”). Instalacja w Krakowie umożliwia zasilenie trzech bloków energetycznych. Natomiast w Lublinie, Łodzi i Nowym Sączu gaz wysypiskowy spalany jest w pochodniach [14].

7. Charakterystyka technologii produkcji biogazu z oczyszczalni ścieków

Pierwszą instalację do produkcji biogazu z oczyszczalni ścieków zbudowano w 1895 roku w Wielkiej Brytanii. Materiałem, z którego pozyskuje się biogaz, w tym wypadku jest osad czynny wytrącony ze ścieków komunalnych, przemysłu mięsnego, rybnego oraz rolno-spożywczego. Proces fermentacji prowadzony jest w zamkniętych wydzielonych komorach fermentacyjnych, najczęściej betonowych. Zasadniczo wyróżnia się trzy typy komór – komorę o stałym niezatapionym stropie, o stałym zatopionym stropie oraz o stropie pływającym. Niezależnie od ich typu konieczne jest zastosowanie izolacji cieplnej i uszczelnienia. Materiał do fermentacji wprowadza się rurociągiem od góry, natomiast przefermentowany szlam, który opada na dno komory, odprowadzany jest za pomocą przenośnika ślimakowego. Wytworzony biogaz gromadzi się pod pokrywą i w zależności od jej typu (ruchoma bądź stała) odprowadzany jest w sposób okresowy lub ciągły [14].

W Polsce istnieje ok. 50 instalacji produkujących biogaz z oczyszczalni ścieków. Najstarsze z nich znajdują się w Poznaniu i Gdańsku. Natomiast do grupy najnowocześniejszych oczyszczalni w kraju zalicza się biogazownię w Żywcu, która umożliwia wytworzenie z biogazu energii elektrycznej (maksymalnie 109 kW) oraz energii cieplnej o mocy maksymalnie 186 kW [14].

Knobloch i współpracownicy [15] opracowali dwuetapową technologię produkcji biogazu ze ścieków zanieczyszczonych olejami z nasion i produktami przetwórstwa zbóż, w tym ściekami pochodzącymi z olejarni. Pierwszy etap opierał się na zakwaszeniu ścieku i następnie na oddzieleniu faz w wyniku flotacji, sedymentacji, filtracji, odwirowania lub w wyniku zastosowania procesów elektromagnetycznych – separacja elektryczna i magnetyczna. W drugim etapie ściek poddawano obróbce biologicznej w warunkach beztlenowych w jedno- lub wielostopniowym procesie produkcji biogazu. Na tym etapie stosowano tzw. jednostki nośnikowe o wysoko rozwiniętej powierzchni właściwej, które tworzyły tzw. biofilm. Biofilm zapobiegał niechcianym zrzutom aktywnej biomasy i zwiększał stabilność procesu fermentacji metanowej. Zaproponowana przez Knoblocha i współpracowników technologia umożliwiała przetworzenie w ciągu doby nawet 40 m³ ścieku (dzienny przepływ wody

od 5 do 40 m³), którego chemiczne zapotrzebowanie tlenu ChZT wynosiło od 50 tys. do 100 tys. mg/l. Uzyskany w procesie biogaz zawierał objętościowo od 65 do 70% CH₄. Natomiast z jednego m³ ścieku uzyskiwano 7–8 m³ biogazu [15].

Hoffland [16] również stosował separację ścieku, która odbywała się w osadniku. Proponowana technologia nie ograniczała się jedynie do ścieków komunalnych, gdyż autor przedstawił również rozwiązania dla przetwarzania nawozów naturalnych pochodzących od trzody chlewnej, bydła i drobiu. Według jednego z proponowanych pomysłów materiał wsadowy rozdzielany był w osadniku, skąd części stałe kierowano do reaktora anaerobowego, gdzie zachodziła fermentacja beztlenowa, a uzyskany biogaz przetwarzano na energię cieplną. Frakcja ciekła materiału wsadowego poddawana była przetwarzaniu tlenowemu, anoksyicznemu i beztlenowemu, po czym stosowano ją do nawadniania gleby lub przemywania pomieszczeń inwentarskich [16].

8. Charakterystyka technologii produkcji biogazu rolniczego na świecie i w Polsce

8.1. Produkcja biogazu rolniczego z nawozów naturalnych oraz odpadów pochodzenia zwierzęcego

Omawiając przykłady technologii produkcji biogazu rolniczego, należy zauważyć, iż największa ilość scentralizowanych biogazowni znajduje się w Danii. Ich powstawanie ściśle wiąże się z intensywną hodowlą trzody chlewnej metodą bezściółkową, w wyniku czego obserwowany jest znaczny wzrost ilości gnojowicy, a to z kolei skutkuje pojawieniem się problemów z jej zagospodarowaniem. Stąd też biogazownie w Danii zaopatrywane są głównie tym odpadem. Dodatkowo materiał wsadowy uzupełniany się odpadami organicznymi, np. z przetwórstwa rolno-spożywczego, odpadami komunalnymi czy też osadami ściekowymi. Należy zauważyć, iż przetwarzana gnojowica nie pochodzi tylko od trzody chlewnej, ale również od bydła oraz kur i norek. Pierwszą biogazownią w Danii była instalacja w Vester Hjermitsev, która powstała w 1984 roku, natomiast do grona największych scentralizowanych biogazowni na świecie można zaliczyć instalację w Lemvig oraz Lintrup [17]. Tabela 6 zawiera charakterystykę wybranych biogazowni w Danii.

Liderem w przetwarzaniu odpadów rolnych na energię elektryczną i ciepło, a także wykazującym się największym doświadczeniem i wiedzą w tej dziedzinie są Niemcy. W tym państwie istnieje również duże rozpowszechnienie biogazowni indywidualnych (w przeciwieństwie do Danii, gdzie występują głównie biogazownie scentralizowane).

Do najbardziej znanych technologii pozyskiwania biogazu z odpadów z hodowli np. trzody chlewnej czy bydła zalicza się technologię **Schmidta – Eggerglüssa**, technologię **Ducelliera – Ismana** oraz technologię **Reinholda – Darmstadta**. W pierwszej z wymienionych fermentacji poddawana jest zawiesina obornika, sieczki (paszy) i rozdrobnionych odpadów organicznych w wodzie. Otrzymany biogaz wykorzystuje się do ogrzewania kotła, z którego wydobywa się para ogrzewająca komory fermentacyjne. Dodatkowo komory wyposażone są w pompy, dzięki którym zawiesina stale krąży, w wyniku czego dochodzi do rozbijania powstającego kożucha. Dodatkowo praca pomp umożliwia przetaczanie szlamu pofermentacyjnego do zbiornika bioszlamu, a następnie na pole uprawne. Metoda ta sprawdza się pod względem opłacalności, tylko dla dużych gospodarstw rolnych, których dzienna produkcja biogazu wynosi od 100 do 300 m³ [14].

Charakterystyka wybranych biogazowi w Danii [17]

Lokaliz. biogazowni	Ilość materiału wstadowego [t/dzień]		Produkcja biogazu [mln m ³ /rok] (p = 1 atm)	Pojemność komory fermentacyjnej [m ³]	Temperatura procesu [°C]	Objętość zbiorników biogazu [m ³]	Warunki sanitaryz.	Zagospodarowanie biogazu	Odległość transportu nwozu wozem asenizacyjnym [km]	Koszty inwestycji [mln DKK]	Początek inwestycji
	gnojowica	alternatywna biomasa									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vester Hjermslev	41	13	1	3 × 500 (1500)	37	50	4,5 h w 57°C	CHP*/kocioł gazowy	1,5	12,4	1984
Vegger	42	17	2,1	4 × 230 (920)	55	148	MGR ^T ** przez 3 h w 55°C	CHP*/kocioł gazowy	5	13,4	1986
Davinde	25	3	0,3	750	36	30	–	kocioł gazowy	5,7	5,8	1988
Sinding	117	18	2,4	3 × 750 (2250)	51	150	gnojowica – MGR ^T 4h w 51°C, odpady z gospodarstw domowych – MGR ^T 2,5h w 60°C	CHP*/kocioł gazowy	5	26,2	1988
Fangel	124	19	2,2	3750	37	50	MGR ^T 3,5 h w 60°C	CHP*/kocioł gazowy	6,5	25,3	1989
Ribe	352	68	4,8	3 × 1745 (5235)	53	1000	MGR ^T 4 h w 53°C	CHP*/kocioł gazowy	11	45,3	1990
Lintrup	410	137	5,7	3 × 2400 (7200)	53	2500	MGR ^T 10 h w 53°C	CHP*/kocioł gazowy	7,5	43,6	1990

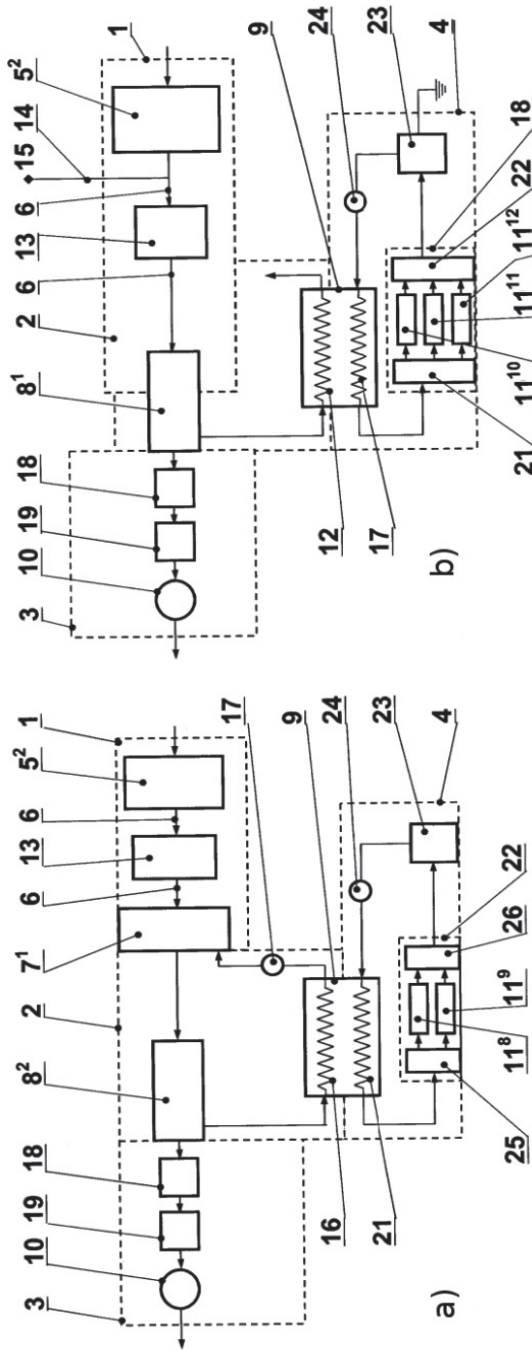
cd. tab. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lenwlg	362	75	5,4	3 × 2533 (7600)	52,5	5000	MGRT 10 h w 52°C	CHP*	7,5	55,2	1992
Hodsager	42	6	0,7	2 × 440 (880)	37	100	brak konieczności sanitaryzacji	CHP*/kocioł gazowy	3	19,2	1993
Hasøj	100	38	3,0	3000	37	2200	MGRT 1 h w 70°C	CHP*/kocioł gazowy	4	21,8	1994
Thorsø	230	31	2,9	2 × 2325 (4650)	53	2790	1 h w 70°C	CHP*	7,5	29,1	1994
Århus Nord	346	46	3,8	8500	38 lub 52***	370	MGRT 6-8 h w 58°C	CHP*	5,5	54,2	1995
Studsgaard	230	36	5,7	2 × 3000 (6000)	52	170	MGRT 2,5 h w 60°C	CHP*	5	55,7	1996
Nysted	180	31	2,6	5000	38	2500	MGRT 8 h w 55°C	CHP*/kocioł gazowy	7	43,7	1998

* CHP= Energia elektryczna do sieci, ciepłownictwo,

** MGRT= Minimalny gwarantowany czas retencji.

*** 38°C dla gnojowicy i odpadków organicznych, 52°C dla odpadów z gospodarstw domowych.



Rys. 3. Schemat instalacji do pozyskania i przetworzenia energii cieplnej z gnojowicy i: a) odpadów rolniczych i odpadów przetwórstwa rolno-spożywczego (instalacja 1), b) słomy zbożowej lub trocinami i odpadami drzewnymi (instalacja 2) [18]; 1 – układ wytwarzania pośredniego czynnika energetycznego, 2 – układ obiegu pośredniego czynnika energetycznego, 3 – układ wytwarzania energii elektrycznej, 4 – układ pęti cieplnej, 5² – fermentor, 6 – przewód gazowy, 7¹ – kocioł parowy wysokociśnieniowy, 8¹ – silnik gazowy, 8² – turbina parowa (urządzenie przetwarzające energię cieplną na energię mechaniczną), 9 – wymiennik ciepła, 10 – generator prądu, 11⁸-11¹² – odbiorniki ciepła 8-12, 12 – podajnik bel słomy, 13 – zbiornik kompensacyjny, 14 – odgałęzienie, 15 – zewnętrzne źródło gazu palnego, 16 – sekcja oddająca wymiennika ciepła, 17 – pompa wodna, 18 – układ sprzęgający, 19 – przekładnia, 21 – sekcja odbierająca wymiennika ciepła, 22 – zespół odbiorników ciepła, 23 – urządzenie do wyrównywania zmienności odbioru ciepła, 24 – pompa wodna, 25 – urządzenie rozdzielające, 26 – węzeł sumujący

Fig. 3. Flow diagram of a plant for generating and processing thermal energy from slurry and: agricultural waste and food processing waste (plant 1), cereal straw or sawdust and wood waste (plant 2) [18]; 1 – indirect energy agent generating system, 2 – indirect energy agent circulation system, 3 – electricity generating system, 4 – loop thermal system, 5² – fermenting vat, 6 – gas pipe, 7¹ – high pressure steam boiler, 8¹ – gas engine, 8² – steam turbine (devices which convert the thermal energy into the mechanical energy), 9 – heat exchanger, 10 – current generator, 11⁸-11¹² – heat receivers 8-12, 12 – straw bales feeder, 13 – compensation (expansion) tank, 14 – ramification, 15 – external source of combustible gas, 16 – heat exchanger heating section, 17 – water pump, 18 – coupling system, 19 – gear, 21 – heat exchanger heat absorbing section, 22 – heat receivers system, 23 –device for compensating heat receiving variation, 24 – water pump, 25 – separator, 26 – terminal node

W technologii **Ducelliera – Ismana** materiałem przetwarzanym jest obornik przechowywany przez 14–50 dni w betonowych zbiornikach. Proces fermentacji prowadzony jest w czterech komorach fermentacyjnych, które napełnia się w zależności od dostępności surowca. W momencie napełniania jednej komory, proces fermentacji trwa już w dwóch innych komorach, natomiast komora czwarta jest opróżniana i dezynfekowana. Komory fermentacyjne nie są ogrzewane parą wodną lub wodą, lecz krążącą w wymienniku ciekłą frakcją fermentacyjną oraz ciepłą gnojowicą dostarczaną rurociągiem bezpośrednio z chlewni lub obory. Wydajność takiej instalacji wynosi 2 m³ biogazu na 100 kg obornika [14].

Technologią opracowaną specjalnie na potrzeby małych i średnich gospodarstw rolnych jest technologia **Reinholda – Darmstadta**. Surowcem poddawanym fermentacji jest gnojowica, gromadzona w odpowiednim zbiorniku. Dodatkowo w instalacji znajdują się dwa zbiorniki biogazu, jedna zagłębiona w gruncie komora fermentacyjna o konstrukcji betonowej, a także układ pomp. Okres fermentacji wynosi kilka tygodni, po czym przetworzony osad wywożony jest na pole, natomiast komora napełniana jest zgromadzoną w zbiorniku gnojowicą. Dzienna produkcja biogazu w tej instalacji wynosi maksymalnie 10 m³ gazu [14].

Również w Polsce istnieją instalacje do produkcji biogazu rolniczego stosowanego jako źródło energii cieplnej. Przykładową instalację służącą do uzyskiwania i przetwarzania energii cieplnej przedstawiono na rysunku 3 [18].

Przedstawione na rysunku 3 instalacje produkcji biogazu zasilane są głównie gnojowicą pochodzącą z hodowli trzody chlewnej. W pierwszym przypadku (rys. 3a) instalację zasilano dodatkowo odpadami rolniczymi i odpadami przetwórstwa rolno-spożywczego, w wyniku czego z 8 ton biomasy uzyskiwano 300 kW mocy elektrycznej dziennie. W drugim przypadku (rys. 3b) jako materiał wsadowy fermentatora stosowano gnojowicę zmieszaną z rozdrobnioną słomą zbożową lub zamiennie z trocinami i odpadami drzewnymi. Fermentacji poddawano 15 ton biomasy na dobę, w wyniku czego uzyskiwano 500 kW mocy elektrycznej. W obu przypadkach fermentację przeprowadzono w fermentorze, a uzyskany biogaz transportowany był do zbiornika kompensacyjnego, następnie w przypadku instalacji 1 do komory spalania generatora pary – 7¹, skąd parę przegrzaną kierowano do turbiny parowej i wyprowadzano w postaci pary i skroplin do sekcji oddającej wymiennika ciepła. Instalacja 2 nie zawiera generatora pary, gdyż uzyskany biogaz kierowany jest ze zbiornika kompensacyjnego bezpośrednio do silnika gazowego. Generator prądu zmiennego trójfazowego napędzany przez wał turbiny parowej lub przez wał silnika gazowego w zależności od rodzaju układu wytwarzania pośredniego czynnika energetycznego. Uzyskany prąd przekazywano do sieci elektrycznej. Energię cieplną wytwarzano przy pomocy wody stanowiącej czynnik pośredniczący ogrzewany w sekcji odbierającej wymiennika ciepła, a następnie kierowany do zespołu odbiorników ciepła – 22. Obieg wody odbywa się za pomocą pompy wodnej i działa na zasadzie konwekcji wymuszonej. Ewentualny nadmiar ciepła odbierany jest przez urządzenie do wyrównywania zmienności odbioru ciepła. Odbiornikami ciepła mogą być np. zakład przetwórstwa mięsnego lub tuczarnia trzody chlewnej, jak to miało miejsce w instalacji 1. W przypadku instalacji 2 ciepło kierowane było do pomieszczenia zarodowej hodowli trzody chlewnej oraz zakładu produkcji drzewnej i suszarni drzewa [18].

Zagadnieniem produkcji biogazu z gnojowicy zajmowali się również Bonde i współpracownicy [19], którzy opracowali również związaną z tym koncepcję separacji nawozu naturalnego. Dodatkowo opracowana technologia zawiera metodę przetwarzania zwłok zwierzę-

cych oraz m.in. mięsa i mączki kostnej. Zapewnia alternatywny sposób przetwarzania odpadów pochodzenia zwierzęcego, w wyniku czego uzyskuje się nawóz stosowany na gruntach rolnych. Zdaniem autorów opracowana technologia umożliwia zmniejszenie lub całkowite wyeliminowanie ewentualnej zawartości prionów BSE oraz szkodliwych mikroorganizmów poprzez połączenie obróbki wstępnej odpadów i fermentacji beztlenowej. Unieszkodliwienie dokonuje się w bioreaktorze, gdzie pod ciśnieniem $4 \cdot 10^5 - 8 \cdot 10^5$ Pa, w temperaturze $140-180^\circ\text{C}$ i w środowisku o odczynie zasadowym ($\text{pH} = 10 - 12$) zachodzi częściowa hydroliza prionów BSE. W wyniku tego zakaźne białka stają się podatne na działanie enzymów i ulegają hydrolizie z udziałem proteaz i amidaz. Substancją stosowaną do ustalenia odczynu zasadowego jest wapno. W przypadku przetwarzania gnojowicy prowadzona jest również obróbka wstępna, która opiera się na kilku etapach: usuwaniu amoniaku, hydrolizie materii organicznej, higienizacji gnojowicy, ograniczeniu powstawania piany, flokulacji, strąceniu fosforu oraz zapobieganiu powstawania struwitu, którego obecność powoduje utrudnienia w pracy wymienników ciepła. W procesie usuwania amoniaku i higienizacji stosowany jest CaO lub Ca(OH)_2 , który powoduje strącenie ortofosforanów oraz dodatkowo przyczynia się do zmniejszenia chemicznego zapotrzebowania tlenu (ChZT), w wyniku wytrącania innych soli wapnia. Otrzymany w procesie fermentacji biogaz może być skutecznie zastosowany do ogrzewania pomieszczeń inwentarskich lub zasilania elektrowni [19].

Produkcję biogazu z produktów ubocznych z rzeźni badali Hejnfelt i Angelidaki [20]. W tym celu stosowali mączkę mięsno-kostną, mączkę kostną, mięso, krew, włosy, żebra, tłuszcz w ilości 225, 497, 575, 561, 582, 359, 487 dm^3/kg odpowiednio, w stosunku do 50 do 100% obliczonego teoretycznego potencjału metanu. Naukowcy zaobserwowali, że stężenia lotnych kwasów tłuszczowych powyżej 5 g lipidów/ dm^3 oraz amoniaku powyżej 7 g N/ dm^3 w materiale zwierzęcym powodowały obniżenie wydajności produkcji biogazu na skutek hamowania procesu. Natomiast etapy obróbki wstępnej, na którą składały się pasteryzacja w temperaturze 70°C , sterylizacja w 133°C oraz hydroliza zasadowa nie wpływały na wydajność procesu. Hejnfelt i Angelidaki wykazali, że odpady zwierzęce stanowią wydajne podłoże do produkcji biogazu, gdyż przy ich zmieszaniu uzyskuje się wysoki potencjał produkcji metanu, który wynosi 619 dm^3/kg CH_4 . Wartość ta znacznie przekracza potencjał produkcji metanu uzyskiwany podczas fermentacji nawozów naturalnych, mieszczący się w granicach od 20 do 30 dm^3/kg CH_4 . Wykazano również, że jednoczesna fermentacja obornika świńskiego i odpadów wieprzowych w ilości 5%, prowadzona w temperaturze 37°C skutkowałą zwiększeniem produkcji metanu o 40% w stosunku do procesu fermentacji samego obornika. Istotnym problemem podczas fermentacji odpadów zwierzęcych jest wysoka zawartość amoniaku, uwalnianego w warunkach termofilnych, dlatego też autorzy sugerują, aby proces fermentacji prowadzić w warunkach mezofilnych [20].

Halfter [21] opracował technologię produkcji biogazu z odchodów zwierzęcych oraz ciepłego nawozu, do którego w celu usunięcia amoniaku dodawany jest CO_2 lub CaSO_4 . Użytkany na drodze fermentacji beztlenowej biogaz zasilal lokalną elektrownię.

8.2. Produkcja biogazu rolniczego z surowców roślinnych

Produkcja biogazu może odbywać się również z roślin specjalnie w tym celu wyhodowanych. W 2009 roku Schlotter [22] opatentował technologię produkcji biogazu i nawozu z roślin hodowlanych o obniżonej zawartości ligniny w stosunku do roślin dziko rosnących.

Jako substrat zastosował kiszonkę (paszę soczystą zakonserwowaną naturalnie), słomę, siano, koncentrat paszowy i inne części roślin, pochodzące od brązowo-żyłkowych (BMR) odmian kukurydzy, sorga i prosa, otrzymanywanych m.in. w wyniku naturalnej mutacji genetycznej. Proces produkcji biogazu składa się z dwóch etapów. W pierwszym z nich materiał roślinny suszy się w komorach suszenia przez 48 godzin w temperaturze 50–60°C. Następnie za pomocą młyna tnącego, zmniejsza się wielkość cząstek surowca do rozmiarów ok. 1 mm, co umożliwia jego homogenizację i zwiększa efektywność fermentacji. Przed właściwym procesem powstawania biogazu ma miejsce również hydroliza kwasowa. Fermentacja substratów zachodzi przy udziale szczepów bakterii. W tym przypadku zastosowano bakterie acetogenne i metanogenne oraz mezofile i termofilne. Kultury tych bakterii mogą być otrzymywane w bioreaktorach lub ich źródłem może być kompost oraz gnojowica i obornik. Proces fermentacji prowadzony jest w fermentatorach różnego typu, np. przepływowych komorach fermentacyjnych, reaktorze hybrydowym z pełnym wymieszaniem (CSTR), reaktorze hybrydowym (STR), reaktorze periodycznym lub reaktorze zbiornikowym z ciągłym mieszaniem. Proces fermentacji prowadzi się w zakresie temperatur 12,8–37,8°C i odczynie materiału od 7 do 8. Zastosowanie materiału roślinnego o obniżonej zawartości ligniny zwiększyło wydajność procesu. W zależności od użytego substratu otrzymano 340–355 dm³ CH₄/kg suchej masy organicznej, przy czym zawartość metanu w biogazie wynosiła zazwyczaj od 45 do 55% całkowitej objętości biogazu, natomiast w najlepszym przypadku ilość CH₄ wyniosła od 65 do 70% całkowitej objętości biogazu. Zastosowanie substratów BMR skutkowało nie tylko zwiększeniem produktywności procesu, w wyniku wzrostu wydajności metanu na jednostkę biomasy, wzrostu zawartości metanu na jednostkę objętości biogazu oraz w wyniku obniżenia czasu retencji substratów w fermentatorze, ale także obniżeniem kosztów produkcji biogazu [22].

Holm i współpracownicy [23] pozyskiwali biogaz z materii organicznej, którą określali jako materię zieloną, którą stanowiły rośliny takie jak lucerna, trawa i koniczyna, a także rzepak, kukurydza, słonecznik, buraki cukrowe, rzepa, kapusta, ziemniaki, groch, fasola, soczewica, len i lubin. Stosowano również produkty rolne, takie jak kiszonka, słoma, ziarna zbóż oraz wyroby zbożowe. Zieloną materię poddawano suszeniu do momentu osiągnięcia 50% (wagowo) zawartości suchej masy. Następnie materiał był granulowany i mieszany z cieczą w celu uzyskania konsystencji szlamu. Proces fermentacji beztlenowej prowadzono w gazoszczelnym reaktorze, z którego odprowadzano uzyskany biogaz i przefermentowany osad [23].

9. Wnioski

Bez wątpienia biomasa i powstający w wyniku jej przetwarzania biogaz stanowią cenne źródło energii elektrycznej i cieplnej, ponadto są alternatywą dla metod konwencjonalnych, zanieczyszczających środowisko naturalne. Rodzaje rozwiązań technologicznych wytwarzania biogazu, ściśle wiążą się z dostępnością substratów procesu. Jako przykład może posłużyć Dania, która dysponuje nadwyżką gnojowicy, a jednym ze sposobów zagospodarowania tego odpadu jest produkcja biogazu. Jako inny przykład można podać Stany Zjednoczone, które są potentatem w uprawie kukurydzy, którą także przetwarzają w fermentacji beztlenowej. W obecnych czasach dąży się do zwiększenia zużycia energii przetworzonej z biogazu

w stosunku do energii wytworzonej ze źródeł konwencjonalnych, aczkolwiek ilość nowopowstałych, a także planowanych instalacji fermentacji zależy często od tzw. kosztów inwestycyjnych. Dlatego też rządy wielu krajów kładących nacisk na rozwój technologii proekologicznych, wspierają budowę instalacji do produkcji biogazu. Rozwiązania technologiczne dotyczące otrzymywania biogazu są stale udoskonalane. Powstają też nowe technologie, wykorzystujące inne substraty procesu (np. rośliny BMR). Obecnie jednak obserwuje się zainteresowanie w kierunku sposobów oczyszczania biogazu z wody i związków siarki, co ma na celu zwiększenie jego wartości opałowej.

Literatura

- [1] *Energia ze źródeł odnawialnych w 2009 roku*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2010 (www.stat.gov.pl).
- [2] *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego*, pod red. E. Głodek, Wyd. Instytut Śląski, Opole 2007.
- [3] *Biogas composition*, Biogas renewable energy – Information webside on biogas (<http://www.biogas-renewable-energy.info/>).
- [4] Arthur R., Baidoo M.F., Antwi E., *Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study*, *Renewable Energy* 36, 2011, 1510-1516.
- [5] Ledakowicz S., Krzystek L., *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego*, *Biotechnologia* 3, 70, 2005, 165-183.
- [6] *Zgłoszenie patentowe nr US 2010/0304457 A1*, USA.
- [7] Głaszka A., Wardal W.J., Romaniuk W., Domasiewicz T., *Biogazownie rolnicze*, Monografia, MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.
- [8] *Zgłoszenie patentowe nr US 2008/0124775 A1*, USA.
- [9] Carrère H., Sialve B., Bernet N., *Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments*, *Bioresource Technology* 100, 2009, 3690-3694.
- [10] Bougrier C., Delgenès J.P., Carrère H., *Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion*, *Chemical Engineering Journal* 139, 2008, 236-244.
- [11] Kowalczyk-Juško A., *Efektywność produkcji biogazu z odpadów rolniczych i przetwórstwa rolno-spożywczego*, *Zeszyty Naukowe* 11, 2009, 149-154.
- [12] Kujawski O., *Przegląd technologii produkcji biogazu*, cz. I, *Czysta Energia*, 12, 2009.
- [13] Początek M., Janik M., *Fermentacja metanowa. Technologie, urządzenia, przykłady* (http://www.en4.pl/documents/Fermentacja_metanowa.pdf).
- [14] Lewandowski W.L., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wyd. IV uaktualnione, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001, 2007.
- [15] *Patent nr US 6391202 B1*, USA.
- [16] *Patent nr US 7005068 B2*, USA.
- [17] Al Seadi T., *Danish Centralised Biogas Plants – Plant Descriptions*, Bioenergy Department, University of Southern Denmark (<http://web.sdu.dk/bio/pdf/rap2.pdf>).
- [18] Patent nr 199032, Polska.
- [19] Patent nr US 7883884 B2, USA.

- [20] Hejnfelt A., Angelidaki I., *Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products*, Biomass and bioenergy 33, 2009, 1046-1054.
- [21] Patent nr US 5616163 A, USA.
- [22] Zgłoszenie patentowe nr US 2009/0017487 A1, USA.
- [23] Zgłoszenie patentowe nr US 2006/0006111 A1, USA.

