

Magdalena Pierścieniak*, Bronisław Bartkiewicz**

ZAGOSPODAROWANIE BIOGAZU POWSTAJĄCEGO W PROCESIE FERMENTACJI METANOWEJ W OCZYSZCZALNIACH ŚCIEKÓW

MANAGEMENT OF BIOGAS PRODUCED IN THE METHANE FERMENTATION PROCESS IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

Słowa kluczowe: biogaz, energia odnawialna, fermentacja metanowa, osady ściekowe.

Key words: biogas, renewable energy, methane fermentation, sewage sludge.

The formation of sludge is closely associated with the process of wastewater treatment. Sludge management and particularly the use of sewage sludge arising from sewage sludge, must take into account environmental requirements.

Sewage sludge as a substance in more than 70% organic can be a source of renewable energy. The easiest way to obtain energy is methane fermentation of sewage sludge and biogas production. The energy contained in the biogas can be converted directly into heat or electricity and heat.

To rationally evaluate the usefulness of sewage sludge as a renewable energy source is necessary to gain insight into the possibilities of fermentation gas and technologies enabling the processing of sewage sludge into biogas and then electricity.

The article presents an overview of knowledge on methane fermentation. It focuses primarily on the treatment, transfer and storage of biogas produced in the process. A review of the equipment used to produce heat and electricity (including associated systems) from biogas produced in the process of methane fermentation of sewage sludge.

* **Mgr inż. Magdalena Pierścieniak – Zakład Technologii Ścieków i Biologii Sanitarnej, Instytut Ochrony Środowiska - Państwowy Instytut Badawczy, ul. Koletorska 4, 01-692 Warszawa; tel.: 22 833 42 41 w. 22; e-mail: magdalena.pierscieniak@jos.edu.pl**

** **Prof. dr hab. inż. Bronisław Bartkiewicz – Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejskiego 20, 00-653 Warszawa; tel.: 22 234 54 05.**

1. WPROWADZENIE

Powstawanie osadów ściekowych jest ściśle związane z procesem oczyszczania ścieków. Właściwości fizykochemiczne osadów zależą od rodzaju oczyszczanych ścieków, a także od technologii stosowanej na oczyszczalni.

Osady powstające na oczyszczalniach komunalnych mają tendencję do zagniwania, co jest związane z wydzielaniem nieprzyjemnych i uciążliwych zapachów. Charakteryzuje je także wysokie uwodnienie, co utrudnia proces ich przeróbki i zagospodarowania.

Osady powstające w oczyszczalniach komunalno-przemysłowych wykazują, ze względu na swój skład, mniejszą tendencję do zagniwania i większą zdolność do oddawania wody. W zależności od rodzaju przemysłu, z którego ścieki trafiają na oczyszczalnię, osady te cechuje bardzo różnorodny skład. W przeciwieństwie do osadów z oczyszczalni komunalnych zazwyczaj cechuje je podwyższona zawartość metali ciężkich i składników toksycznych.

Gospodarka osadowa, a zwłaszcza wykorzystanie powstających na oczyszczalniach osadów ściekowych, musi uwzględniać wymagania środowiskowe. Budowa coraz większej liczby oczyszczalni, a także wykorzystywanie coraz skuteczniejszych i efektywnych procesów oczyszczania ścieków miejskich, przyczynia się do zwiększenia ilości osadów ściekowych o charakterze organicznym. Według danych GUS ilość wytwarzanych w Polsce osadów ściekowych przekroczyła pół miliona ton w suchej masie. Według tych samych danych prawie dwuletnia produkcja osadu zmagazynowana jest na terenach składowych oczyszczalni i nie widać perspektyw ich utylizacji.

Osady ściekowe jako substancja w ponad 70 procentach organiczna, może być źródłem energii odnawialnej. Najprostszym sposobem pozyskiwania energii jest fermentacja metanowa osadów ściekowych i wytwarzanie biogazu. Wykorzystanie osadów ściekowych jako źródła energii odnawialnej zmniejsza ilość składowanych osadów, a co za tym idzie ich uciążliwości na środowisko. Energia zawarta w biogazie może być przetwarzana bezpośrednio na ciepło, albo na energię elektryczną i ciepło. Drugie rozwiązanie jest znacznie korzystniejsze, lecz pociąga za sobą dodatkowe koszty inwestycyjne.

Ze względu na politykę ekologiczną narzuconą państwu członkowskim Unii Europejskiej zgodnie z Dyrektywą Unijną 2001/77/WE z dnia 27 września 2001 roku [Dyrektywa... 2001] istotne staje się pozyskiwanie i wykorzystywanie biogazu na cele energetyczne. Sejm Rzeczypospolitej Polskiej dostosowując się do wymogów przywołanej Dyrektywy zatwierdził strategię rozwoju sektora energetycznego. Na jej mocy Polska powinna do 2010 roku osiągnąć produkcję energii ze źródeł odnawialnych na poziomie 7,5%, a do końca 2020 roku – 15%. W związku z czym coraz większe znaczenie będzie miała także energia pozyskiwana z biogazu, powstającego w czasie stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych na oczyszczalniach ścieków, który ze względu na dobre właściwości energetyczne stanowi istotną konkurencję dla gazu ziemnego.

2. FERMENTACJA METANOWA

Jedną z podstawowych metod przeróbki osadów ściekowych powstających przy oczyszczaniu ścieków bytowo-gospodarczych jest fermentacja metanowa. Stabilizacja beztlenowa polega na biochemicznym rozkładzie związków organicznych zawartych w osadach ściekowych przez bakterie beztlenowe. W wyniku zachodzących w warunkach beztlenowych procesów następuje znaczne obniżenie suchej masy osadu, a zwłaszcza ich części organicznych. Po zakończeniu procesu fermentacji osad zawiera mniej zarodników patogennych, jaj robaków i mikroorganizmów chorobotwórczych [Zhang i in. 2008; Fytli, Zabaniotou 2008]. W wyniku fermentacji metanowej, w dobrze wypracowanych komorach, powstaje:

- 1) gaz fermentacyjny, zawierający około 70% metanu i około 30% dwutlenku węgla;
- 2) ciecz osadowa, zawierająca amoniak;
- 3) osad przefermentowany, bogaty w siarczki.

Gaz fermentacyjny jest mieszaniną gazów, których proporcje ulegają znacznym wahanom. W optymalnych warunkach prowadzenia procesu gaz fermentacyjny zawiera 60 – 70% metanu i 29 – 39% dwutlenku węgla, a także 0,1 – 0,7% siarkowodoru. Skład gazu fermentacyjnego zależy głównie od rodzaju substancji, jakie ulegają rozkładowi w komorze fermentacyjnej. Gaz o największym udziale metanu (najlepszy jakościowo) uzyskuje się w wyniku rozkładu białka, natomiast ilościowo najwięcej gazu uzyskuje się z tłuszczu. Ilość powstającego w procesie fermentacji gazu jest związana ze stopniem zmniejszenia ChZT i wynosi średnio 0,35 m³ metanu z 1 kg usuniętego chemicznego zapotrzebowania na tlen. Ilość powstającego gazu jest powiązana ze sposobem oczyszczania ścieków na oczyszczalni [Bień 2008; Cywiński i in. 1972; Sadecka, Myszograj 2007].

Proces stabilizacji beztlenowej można realizować w takich urządzeniach jak: osadniki gnilne, osadniki Imhoffa oraz otwarte i zamknięte wydzielone komory fermentacyjne [Oleszkiewicz 1998; Plaza 1996; Schuck 2006].

Proces fermentacji metanowej jest procesem wielofazowym. Składa się z czterech faz:

- 1) hydrolizy;
- 2) fazy kwaśnej;
- 3) fazy octanogennej;
- 4) fazy metanowej;

uzależnionych od mikroorganizmów biorących udział w procesie fermentacji metanowej, a także od dostępnych dla nich substratów pokarmowych.

Parametrami charakteryzującymi prawidłowy przebieg procesu fermentacji są:

- 1) stopień rozkładu substancji organicznych;
- 2) ilość i skład gazu fermentacyjnego;
- 3) stężenie lotnych kwasów tłuszczowych (LTK) i zasadowości;
- 4) wartość stosunku ilości lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości.

Parametry pracy i wskaźniki jakości osadu dla jednostopniowej fermentacji metanowej przedstawiono w tabeli 1.

Prawidłowy przebieg procesu fermentacji oceniany jest na podstawie kontroli zawartości lotnych kwasów tłuszczowych, zasadowości i odczynu. Przy czym wartość pH ulega szybkiemu spadkowi w momencie, kiedy proces fermentacji uległ już załamaniu. Wzrost stosunku lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości (LTK/zas) znacznie wyprzedza w czasie niekorzystne zmiany zachodzące w komorze fermentacyjnej, w związku z czym stanowi lepszy wskaźnik do kontroli procesu. Szybko ulega ustaleniu dość stabilna wartość tego parametru przy prawidłowej pracy komory fermentacyjnej, a jego nagły wzrost (powyżej 0,3) daje sygnał o wystąpieniu zakłóceń w pracy komory [Cywiński i in. 1972; Bartoszewski i in. 1997].

Tabela 1. Parametry pracy i wskaźniki jakości osadu dla jednostopniowej fermentacji mezofilowej [Bartoszewski 1995]

Table 1. Operating parameters and quality indicators for single-sludge mesophilic fermentation

Parametr/wskaźnik	Warunki preferowane	Uwagi
Temperatura °C	35 – 37	istotne utrzymywanie ścisłej kontroli w zakresie $\pm 1^\circ\text{C}$
Odczyn	około 7,0	pH wpływa na stosunek CH_4/CO_2
Czas zatrzymania osadu [d]	15 – 25	krótszy czas zatrzymania w komorach o kształcie jajowym; ściśle powiązany z obciążeniem masą organiczną
Obciążenie masą organiczną [kg/m^3]	0,5 – 4	wyższe dopuszczalne stężenia dla procesu dokładnie kontrolowanego w komorach o kształcie jajowym
Zasadowość	2000 – 3000	zaleca się dodawanie CaCO_3 , jeżeli stosunek LKT/zas $> 0,1$
Lotne kwasy tłuszczowe [$\text{mg CH}_3\text{COOH}/\text{dm}^3$]	200 – 600	zmiana w ilości LKT jest oznaką problemów eksploatacyjnych
Stężenie suchej masy na dopływie do komory [% sm.]	2 – 7	trzeba stosować wstępne zagęszczanie, by utrzymać warunki preferowane
Zmniejszenie stężenia masy organicznej [%]	50 – 70	klasa B osadów biologicznych wg US EPA wynosi min. 38%
Produkcja biogazu [m^3/kg]	0,3 – 0,5 dla suchej masy organicznej na dopływie	maksymalna produkcja CH_4 wynosi 0,35 m^3/kg usuniętego ChZT
Zawartość CH_4 w biogazie [%]	60 – 70	wartość większa dla wysokiej zasadowości i wysokiego pH
Zawartość H_2S w biogazie [%]	ślady	toksyczny poziom $\text{H}_2\text{S} > 6\%$; zawartość wzrasta przy spadku pH
Rozpuszczone siarczki [mg/dm^3]	$\ll 50$	zależy od wartości pH; wyższy poziom siarczków jest tolerowany przy wyższym pH
Amoniak [mg/dm^3]	< 100 jako niezdysocjowany NH_4	przy obojętnym pH tolerowane 2000 – 5000 $\text{mg Ncałk.}/\text{dm}^3$; toksyczny głównie amoniak niezdysocjowany
Toksyczne związki organiczne	możliwie najmniejszy poziom	stężenia toksyczne dla bakterii metanowych są zbliżone jak dla bakterii tlenowych, wyjątek stanowią chlorowane związki alifatyczne dziesięciokrotnie bardziej toksyczne dla bakterii metanowych.

3. SPOSÓB ZAGOSPODAROWANIA GAZU FERMENTACYJNEGO

Proces oczyszczania ścieków stwarza możliwość odzysku energii, która jest skumulowana w osadach ściekowych, poprzez wytworzenie z nich gazu fermentacyjnego. Wartość opałowa 1 m³ biogazu wynosi od 6–8 kWh [Oh, Logan 2005]. W tabeli 2 podano wartości opałowe innych paliw.

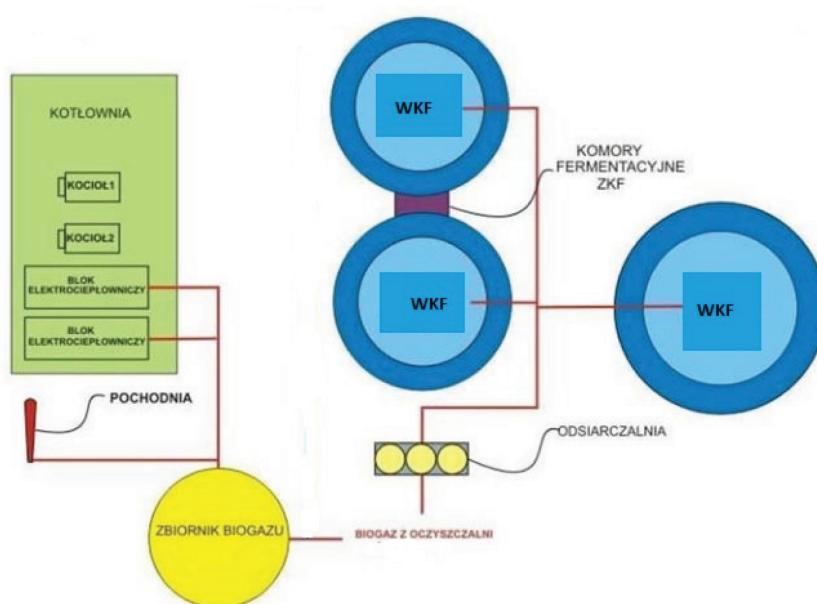
Tabela 2. Wartość opałowa różnych paliw [Bień 2008]

Table 2. The calorific value of different fuels

Paliwo	Wartość opałowa
Metan	10 kWh/m ³
Gaz fermentacyjny z 70% zawartością metanu	7 kWh/m ³
Gaz ziemny	9,5 kWh/m ³
Gaz miejski	4,7 kWh/m ³
Benzyna	8,5 kWh/m ³
Olej napędowy	11 kWh/m ³

Ze względu na swój skład biogaz wymaga odpowiedniego oczyszczania, przesyłania, magazynowania i wykorzystania.

Przykładowy, uproszczony schemat instalacji biogazu w oczyszczalni ścieków przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Uproszczony schemat instalacji biogazu na oczyszczalni ścieków [www.ogrzewnictwo.pl]

Fig. 1. Simplified diagram of the biogas plant for sewage treatment

4. OCZYSZCZANIE GAZU FERMENTACYJNEGO

4.1. Usuwanie zanieczyszczeń

Biogaz powstający w wyniku procesów fermentacji jest zanieczyszczony cząstkami osadów, pianą, parą wodną i siarkowodorem. W celu usunięcia cząstek osadu i piany stosuje się zazwyczaj łapacze piany umieszczone w dzwone gazowym. Gdy ilość piany jest na tyle duża, że opuszcza ona komorę razem z powstałym gazem fermentacyjnym, zaleca się połączenie łapacza piany z procesem gaszenia piany wodą.

Po opuszczeniu komory gaz pozbawia się zanieczyszczeń w osadnikach dla cząstek stałych. Pozostałe w gazie zanieczyszczenia usuwa się na żwirowych filtrach gruboziarnistych, a następnie na ceramicznych filtrach drobnoziarnistych [Cywiński i in. 1972].

4.2. Odsiarczanie gazu

Odsiarczanie przez filtrację. Następnie gaz poddawany jest procesowi odsiarczania. Najczęściej usuwa się siarkowodor przez filtrację na złożu rudy darniowej. Siarkowodor jako gaz pochodzący z rozkładu substancji białkowych łatwo ulega hydrolizie i oddziałuje korozyjnie na metale, z których zbudowane są urządzenia do oczyszczania biogazu. Zanieczyszczony siarkowodorem biogaz jest kierowany do złoża rudy darniowej od dołu do góry, gdzie zachodzi adsorpcja.

Reakcja przebiega łatwiej w odczynie zasadowym, w związku z czym do złoża dodaje się wapna. W czasie oczyszczania biogazu zdolność sorpcyjna rudy darniowej ulega zmniejszeniu, w związku z czym należy przeprowadzać okresowo jego regenerację. Polega ona na przedmuchiwaniu złoża sprężonym powietrzem z dodatkiem pary wodnej. Dawka powietrza powinna wynosić od 1 do 3% objętości gazu, w zależności od zawartości siarkowodoru w gazie fermentacyjnym [Cywiński i in. 1972].

Absorbacja na węglu aktywnym. Odsiarczanie gazu można prowadzić z wykorzystaniem adsorpcji na węglu aktywnym. W celu regeneracji złoża węglowego stosuje się ekstrakcję dwusiarczkiem węgla lub desorpcję gorącym gazem [Skalmowski i in. 2006].

Odsiarczanie na mokro. Kolejną z metod usuwania siarkowodoru z gazu fermentacyjnego jest odsiarczanie na mokro. Gaz doprowadza się do płuczki wieżowej, gdzie zachodzą procesy adsorpcji chemicznej i fizycznej. Regeneracja cieczy roboczej znajdującej się w płuczce następuje w wyniku zmniejszenia ciśnienia w płuczce bądź wygotowania. Metoda odsiarczania na mokro na skalę przemysłową wykorzystywana jest jedynie w Szwajcarii.

Odsiarczanie biologiczne. Istnieją dwa typy urządzeń do biologicznego usuwania siarkowodoru: biofiltry i płuczki (rys. 2). Biofiltry (w postaci złóż biologicznych) są urządzeniami otwartymi, w których wytworzone na powierzchni złoża bakterie siarkowe utleniają siarkowodor do siarki. Złoże zrasza się od góry ciepłą wodą w celu zapewnienia odpowied-

niej jego wilgotności, a także, aby wymyć zgromadzoną siarkę. Po pewnym czasie pracy biofiltru ustala się równowaga między mikrobiologicznym procesem tworzenia siarki, a jej wymywaniem w wyniku zraszania złoża.

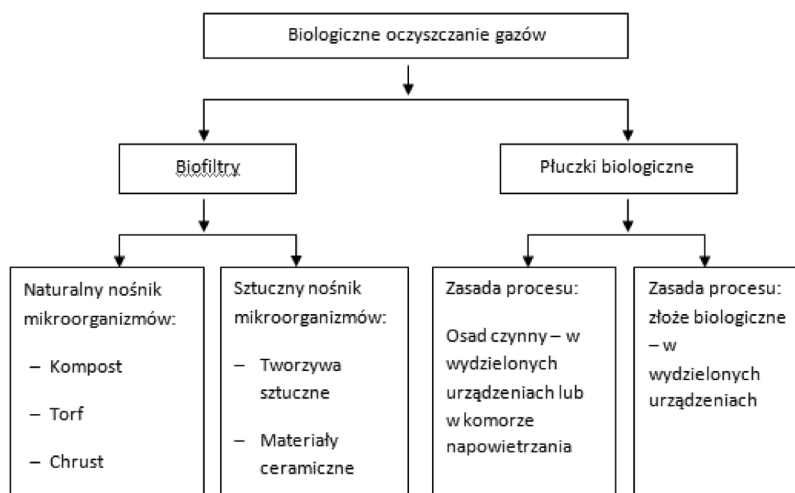
Nośnik mikroorganizmów powinien posiadać jednolitą strukturę i stałą objętość porów. Ważna jest także jego odpowiednia wilgotność: niedostatecznie zwilżony pęka, co powoduje zakłócenia w jednolitym przepływie gazu i zaburza aktywność drobnoustrojów, zwilżony nierównomiernie powoduje powstanie stref beztlenowych o dużych oporach przepływu, co zmniejsza czas kontaktu gazu z filtrem i powoduje miejscowe strefy zagniwania [Bień 2008].

W płuczkach biologicznych (bioskruberach) proces adsorpcji siarkowodoru i jego biologiczny rozkład są przestrzennie oddzielone. W absorberze następuje wymiana masy pomiędzy zanieczyszczonym gazem a absorbentem. Regeneracja zanieczyszczonej cieczy zachodzi w urządzeniu zawierającym osad czynny [Bień 2008].

Oczyszczanie odsiarczonego gazu. Odsiarczony gaz może zawierać w sobie drobne cząstki stałe, których usuwanie odbywa się na filtrach ceramicznych. Przepływ biogazu odbywa się od dołu ku górze. Filtr, który ulegnie zatkananiu, oczyszcza się przez wibrację lub przez wytworzenie dużego ciśnienia w górnej części obudowy filtra. Zanieczyszczenia opadają na dno obudowy, skąd są usuwane.

Prawidłowo oczyszczony gaz jest całkowicie bezwonny, dlatego w celu zapewnienia bezpieczeństwa dodaje się do niego substancje wonne zawierające merkaptany [Cywiński i in. 1972].

Gaz fermentacyjny, który ma zasilać sieć gazu ziemnego musi być dodatkowo poddany oczyszczeniu, w celu uzyskania takiej jakości, jaką ma gaz ziemny. Wzrost zawartości metanu w tym wypadku osiąga się przez usunięcie dwutlenku węgla.



Rys. 2. Urządzenia służące do biologicznego oczyszczania gazów [Bień 2008]

Fig. 2. Equipment used for biological gas purification

5. PRZESYŁANIE GAZU FERMENTACYJNEGO

Przesył gazu fermentacyjnego zależy od sposobu przeróbki osadów na oczyszczalni, a także od ilości ciepła odzyskiwanego.

Przewody gazowe układa się ze spadkiem $1,5 \div 5\%$ umożliwiającym spływ kondensatu. Jeżeli przewody gazowe znajdują się pod ziemią zaleca się stosowanie przewodów z tworzywa sztucznego, jeżeli natomiast przewody układane są na powierzchni lub w pomieszczeniach powinny być wykonane z antykorozyjnej stali nierdzewnej. Gazociągi wyposaża się w manometry do kontroli ciśnienia gazu. Alarm włącza się automatycznie przy spadku ciśnienia o 1 do 3 mbar poniżej wartości roboczej. W miejscu poboru i spalania gazu umieszcza się przerywacze płomienia, które zabezpieczają rurociągi przed dostaniem się do nich ognia. Zaleca się instalowanie przerywaczy jak najbliżej miejsca poboru gazu, by zminimalizować niebezpieczeństwo zapalenia gazu w przewodach.

Produkcja i odbiór biogazu jest procesem nierównomiernym. Ze względu na możliwość wystąpienia nadwyżek gazu konieczne jest instalowanie na przewodzie upustowym pochodni gazu. Urządzenie to włącza się automatycznie w momencie całkowitego wypełnienia zbiorników gazu [Cywiński i in. 1972; Gunnarsson i in. 2008].

6. MAGAZYNOWANIE GAZU FERMENTACYJNEGO

Magazynowanie energii powstającej na oczyszczalni jest łatwe, co jest nie możliwe w razie wykorzystywania energii z elektrowni. Magazynowanie biogazu jest niezbędne ze względu na fakt nierównomierności jego zużycia. Nadmiar biogazu magazynowany jest w wydzielonych zbiornikach i wykorzystywany w sytuacjach jego niedoboru. Jeśli zbiornik jest zbyt mały, nadmiar biogazu musi zostać spalony w pochodni gazowej. Zbiornik gazu w oczyszczalni obsługującej do 50 000 RLM powinien pomieścić 1,5-krotną dobową produkcję gazu fermentacyjnego. Jeżeli gaz jest wykorzystywany w silnikach lub turbinach gazowych objętość zbiornika magazynującego wylicza się według przyjętego trybu pracy tych urządzeń. Pojemność zbiornika powinna wynosić 50% dobowej produkcji biogazu dla podstawowego trybu pracy i 75% dla trybu szczytowego.

Do magazynowania biogazu na oczyszczalniach ścieków wykorzystuje się:

- 1) zbiorniki bezciśnieniowe;
- 2) zbiorniki niskociśnieniowe, do 5 kPa (50 mbar):
 - mokre,
 - membranowe;
- 3) zbiorniki średniociśnieniowe, do 1 MPa (10 bar).

Zbiorniki bezciśnieniowe zbudowane są z cylindrycznego stalowego zbiornika, wewnątrz którego koncentrycznie umieszcza się zbiornik foliowy. W skutek napływu gazu następuje jego rozprężenie w powłoce elastycznej (foli), powiększającej swoją objętość. Ze

względu na brak płyty obciążającej konieczne jest instalowanie dmuchaw odprowadzających gaz ze zbiornika. Rozwiązania bezciśnieniowe są bardzo łatwe w eksploatacji, lecz mało korzystne ze względu na cenę [Heidrich, Nieścier 1999].

Niskociśnieniowe zbiorniki mokre wymagają podgrzewania wody w okresie zimowym oraz wtórnego nawilżania gazu. Może występować problem z korozją zbiornika. Dodatkowo same koszty inwestycyjne są bardzo wysokie. Wszystkie te aspekty powodują, że odchodzi się od ich stosowania w oczyszczalniach ścieków na dużą skalę.

Zbiorniki membranowe składają się ze stalowego, cylindrycznego zbiornika oraz z elastycznej membrany przymocowanej do podłoża zbiornika i do płyty obciążającej. W systemie gazowym powinno być zapewnione ciśnienie od 25 do 50 mbar, które osiąga się poprzez odpowiednie obciążenie membrany. Niskociśnieniowe zbiorniki membranowe budowane na terenie oczyszczalni wykonuje się w formie stojącego cylindra o pojemności do 5000 m³ lub płaskiego cylindra o pojemności od 20 do 150 m³ dowożone do oczyszczalni w pełni złożone. Zbiorniki membranowe mogą być wyposażone w jedną lub dwie powłoki. Powłoki wykonuje się z tworzywa poliestrowego, powlekanego obustronnie PVC i lakierem akrylowym. W zbiornikach dwupowłokowych wewnątrz powłoki zewnętrznej, tzw. dennej, umieszcza się elastyczną powłokę, która zmienia swój kształt w zależności od doprowadzenia i rozbioru biogazu. Powłoka zewnętrzna utrzymuje swój stabilny kształt dzięki dmuchawie powietrza pracującej w trybie ciągłym. Wytrzymałość powłok na rozciąganie wynosi minimalnie 5000 N na 5 cm długości powłoki [Heidrich, Nieścier 1999].

Zbiorniki średniociśnieniowe wykonuje się w postaci wydłużonych zbiorników cylindrycznych lub jako zbiorniki kuliste. Zbiorniki cylindryczne mogą być umieszczane jeden na drugim, co znacznie zmniejsza zajmowaną przez nie powierzchnię. Zbiorniki w postaci kulistej zajmują niewielkie przestrzenie, a w fundamencie takiego zbiornika można umieścić pomieszczenie robocze [Heidrich, Nieścier 1999].

7. WYKORZYSTYWANIE GAZU FERMENTACYJNEGO POWSTAŁEGO W CZASIE STABILIZACJI BEZTLENOWEJ

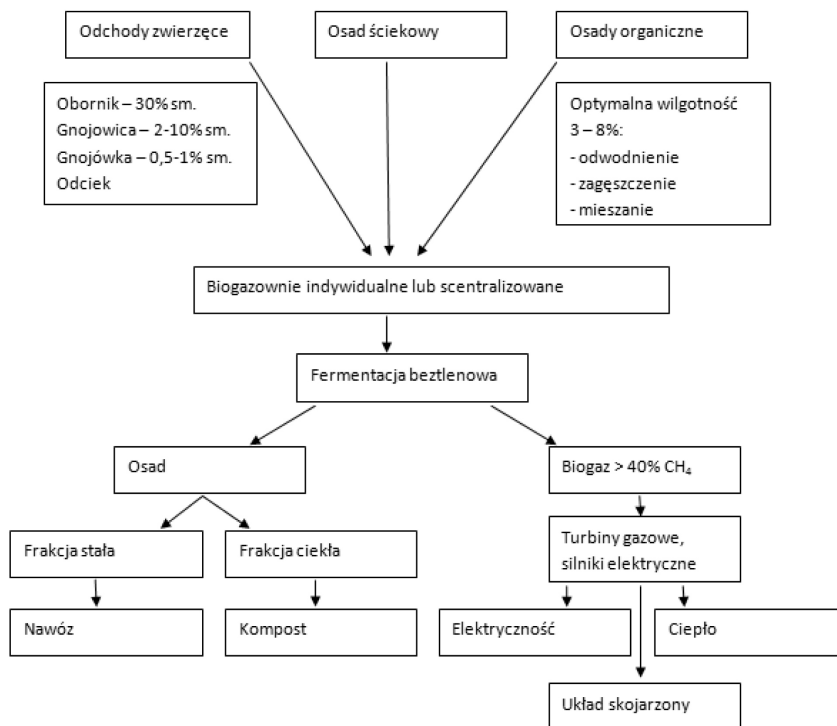
Gospodarka biogazem. Biogaz powstający w procesie beztlenowej stabilizacji osadów ściekowych może być racjonalnie wykorzystywany do:

- 1) wytworzenia energii cieplnej w kotłach do ogrzewania zarówno komór fermentacyjnych, jak i pomieszczeń użytkowych;
- 2) wytworzenia energii mechanicznej w silnikach gazowych do napędu urządzeń;
- 3) wytworzenia energii elektrycznej w silnikach i turbinach gazowych sprzężonych z generatorami prądotwórczymi.

Najlepsze efekty daje skojarzona gospodarka gazem fermentacyjnym. Polega ona na wykorzystaniu wytwarzanej energii najpierw do celów napędowych, a następnie do ogrzewania. Układ ten jest możliwy do wykorzystania, ponieważ temperatura spalin i wody chł-

dzącej pozwala na dalszy odzysk energii cieplnej. Szacunkowy stosunek zapotrzebowania oczyszczalni ścieków w energię elektryczną do zapotrzebowania w energię ciepłą wynosi 2,4 : 1,8 [Cywiński i in. 1972; Demirbaş 2006; Schuck 2006].

Możliwości pozyskiwania i wykorzystania biogazu przedstawiono na rysunku 3



Rys. 3. Możliwości pozyskiwania i wykorzystywania biogazu [Szparkowska 2004]

Fig. 3. The acquisition and use of biogas

Kotły grzewcze. Żeliwne kotły grzewcze ogrzewają wodę do temperatury od 70 do 90°C potrzebnej do ogrzania komór fermentacyjnych. W kotłach instalowane są palniki umożliwiające spalanie dwóch rodzajów paliwa: gazu fermentacyjnego lub oleju albo gazu ziemnego lub propanu. Standardowa sprawność kotłów wynosi 79 – 85 %, przy wymaganym ciśnieniu hydraulicznym dopływu gazu 20 mbar.

Ciepło wytworzone podczas spalania gazu w kotle ogrzewa obieg wody, która poprzez wymiennik ciepła, przekazuje swoją energię cieplną do osadu surowego. Ochłodzona woda ponownie wraca do kotła i cykl ulega zamknięciu.

Użytkowa wartość opałowa biogazu jest iloczynem wartości opałowej gazu (23 000 do 25 000 kJ/Nm³) oraz stopnia sprawności kotła. Użytkowa wartość opałowa gazu fermentacyjnego przy sprawności kotła równej 80% wynosi 19 380 kJ/Nm³ [Heidrich, Nieścier 1999].

Bloki energetyczno-ciepne. Wraz z rozwojem systemów oczyszczania ścieków wzrosło zapotrzebowanie na energię cieplną i elektryczną. W związku z czym zaczęto szukać możliwości wytworzenia „własnej” energii z wykorzystaniem gazu fermentacyjnego.

Odzysk ciepła zależy od rodzaju użytego zespołu energetyczno-cieplnego. Może ono zachodzić w wydzielonych wymiennikach ciepła lub zespolonych z silnikiem i generatorem. W tym drugim wypadku wymiennik stanowi jednocześnie konstrukcję nośną przez co zmniejsza się zajmowana przez układ powierzchnia.

Odzysk ciepła w blokach energetyczno-cieplnych stanowi obieg zamknięty. Pompa wody chłodzącej tłoczy wodę do wymiennika ciepła w silniku, w którym woda ogrzewa się do temperatury 75 – 85°C. Ogrzana woda przepływa przez kocioł, gdzie jest dalej podgrzewana przez gazy odlotowe, skąd trafia na wymiennik ciepła woda – osad. Po przekazaniu swojego ciepła do osadu surowego, schłodzona woda wraca ponownie do wymiennika ciepła w silniku.

Uzyskana energia mechaniczna na oczyszczalniach ścieków może służyć do bezpośredniego napędu urządzeń, np. wirówek czy sprężarek powietrza. Należy tak zaprojektować cały układ, by w momencie przerwy w pracy silnika była możliwość wykorzystania rezerwowego agregatu prądotwórczego. Przykładowy generator do wytwarzania energii z biogazu przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Generator do wytwarzania energii z biogazu [www.ilawskiewodociagi.pl]

Fig. 4. Generator to produce electricity from biogas

Najczęstszym sposobem wykorzystanie energii mechanicznej na oczyszczalniach jest napędzanie generatorów prądotwórczych. Umożliwia to odpowiednie wykorzystanie wytworzonej energii elektrycznej do wszystkich urządzeń na oczyszczalni [Melguizo i in. 2002].

Silnik gazowy sprzężony z agregatem prądotwórczym może pracować w trzech zasadniczych cyklach:

- 1) podstawowe pokrycie zapotrzebowania na energię;
- 2) szczytowe pokrycie zapotrzebowania na energię;
- 3) pokrycie zapotrzebowania na energię oczyszczalni wraz z zasilaniem sieci zewnętrznej.

Tryb pracy wybiera się w zależności od: warunków pracy oczyszczalni, wydajności urządzeń bloku energetyczno-ciepłego, zbiornika gazu i jego pojemności oraz od wysokości taryfy opłat za energię dostarczaną z zewnątrz.

Cykl podstawowego pokrycia zapotrzebowania na energię polega na równomiernym wytwarzaniu prądu elektrycznego w ciągu doby. Jest on zależny głównie od pojemności zbiornika gazu na oczyszczalni, która powinna stanowić 30–50 % dobowej produkcji gazu. Równomierny rozkład pracy urządzeń bloku energetyczno-ciepłego wpływa korzystnie na ich trwałość. Zaleca się ustalanie takiego cyklu pracy zwłaszcza dla małych i średnich oczyszczalni ścieków.

Szczytowy cykl pracy ma pokryć zapotrzebowanie na energię z własnego źródła w godzinach wysokich taryf cenowych. Zbiornik gazu umożliwiający taki cykl pracy powinien mieć pojemność 70 – 100% dobowej produkcji gazu. Ze względu na spalanie dużej ilości gazu w krótkim czasie powstaje duża ilość ciepła odłotowego. Szczytowy cykl pracy wymaga znacznie większych urządzeń bloku energetyczno-ciepłego i powoduje znaczny wzrost kosztów inwestycyjnych. Nierównomierny tryb pracy urządzeń przy dużym obciążeniu może być przyczyną ich częstych napraw.

Zasilanie zewnętrznej sieci energetycznej jest uwarunkowane ilością energii przekazywanej z oczyszczalni, czasem, w którym ma nastąpić zasilanie sieci oraz taryfami cenowymi za energię [Stępnik 2006].

W kogeneracyjnych blokach energetycznych moc ogólną rozdziela się na moc elektryczną i moc cieplną, których parametry zależą od współczynników sprawności bloku. Ich przeciętne wartości kształtują się następująco [Stępnik 2006]:

- 1) współczynnik sprawności elektrycznej $\eta_{el} \approx 0,35$;
- 2) współczynnik sprawności cieplnej $\eta_t \approx 0,55$.

Jednostkowe zapotrzebowanie na biogaz do wytworzenia 1 kWh energii w silniku gazowym sprzężonym z agregatem prądotwórczym wynosi 0,66 m³/kWh. Wykorzystanie gazu fermentacyjnego pozwala na pokrycie 60% zapotrzebowania oczyszczalni na energię. W praktyce pokryte zostaje 90–100% zapotrzebowania na energię cieplną i 40% na energię elektryczną.

W zespole prądotwórczym mogą być wykorzystywane silniki gazowe z obiegiem Otto i silniki gazowe Diesla. W silniku Otto zapłon wywołany jest iskrą elektryczną na świecy zapłonowej, a w silniku Diesla następuje samozapłon, w wyniku dodania do mieszanki gazowo-powietrznej oleju napędowego Diesla. Ze względu na konieczność dodawania dodatkowej dawki paliwa napędowego (ok.10% ogólnej ilości doprowadzonego

gazu fermentacyjnego) w postaci oleju napędowego do silnika Diesla zwiększa się nakład kosztów eksploatacyjnych. Silniki Otto są typowymi silnikami gazowymi, w związku z tym w razie przerwy w dopływie biogazu należy zastosować paliwo zastępcze w postaci propanu lub gazu ziemnego [Cupiał, Mendera 1996; Błaszczyk-Pasteczka, Żukowski 2007; Afgan i in. 2007].

8. ZAPOTRZEBOWANIE NA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ

Nie ma możliwości ustalenia konkretnej jednostkowej wartości zapotrzebowania na energię ze względu na wzrastające wymagania dotyczące stopnia oczyszczania ścieków i przeróbki osadów, rozbudowy ciągów technologicznych oraz automatyzacji procesów.

Energia elektryczna w kompleksie urządzeń do stabilizacji osadów jest zużywana głównie do napędzania mieszadeł komór fermentacyjnych oraz pomp zasilających i recyrkulujących. W praktyce zapotrzebowanie na energię elektryczną na oczyszczalni ścieków waha się w zakresie 16 – 19 kWh/M³ a [Heidrich, Nieścier 1999].

9. STRATY ENERGII

Podczas trwania procesu stabilizacji beztlenowej osadów następują straty ciepła wynikające z różnicy temperatur na powierzchni wspólnej dwóch ośrodków. Występują one zarówno w komorze fermentacyjnej, jak i w armaturze i sieci przewodów. Straty ciepła wynikające z promieniowania przez ściany komory fermentacyjnej stanowią od 10 do 25% ogólnego zapotrzebowania na ciepło do ogrzania osadu.

W bilansie energetycznym uwzględnia się średnie wartości temperatur osadu, powietrza i gleby, uzależnione od pór roku i regionu, w jakim zlokalizowana jest oczyszczalnia ścieków.

Straty ciepła w wymienniku ciepła stanowią około 5% przekazywanej energii. Wartość ta dotyczy wymienników rurowych, przeciwprądowych.

Straty ciepła na przewodach przesyłowych stanowią niewielką wartość w porównaniu ze stratami spowodowanymi promieniowaniem przez ściany komory fermentacyjnej. Wielkość tych strat zależy od zastosowanej izolacji przewodów oraz ich miejsca ułożenia (pod powierzchnią gruntu, na powierzchni gruntu lub w pomieszczeniu). Wielkość strat ciepła w przewodach przesyłowych i w armaturze szacuje się na 10% strat ciepła w wyniku promieniowania przez ściany komory fermentacyjnej [Heidrich, Nieścier 1999].

10. PODSUMOWANIE

Powstawanie osadów ściekowych jest ściśle związane z procesem oczyszczania ścieków. Osady ściekowe jako substancja w ponad 70 procentach organiczna może być źród-

dłem energii odnawialnej. Najprostszym sposobem pozyskania energii jest fermentacja metanowa osadów ściekowych i wytwarzanie biogazu. Powstający w czasie procesu biogaz ze względu na swoją wartość opałową może stanowić źródło energii, która w znacznym stopniu pokryje zapotrzebowanie oczyszczalni ścieków na energię cieplną i elektryczną. Wykorzystanie biogazu do wytwarzania energii powoduje bardzo małą emisję (w tym pyłów) do atmosfery podczas spalania.

Ze względu na swój skład biogaz wymaga odpowiedniego oczyszczania. Odpowiednie instalacje do transportu i magazynowania gazu fermentacyjnego zapewniają bezpieczeństwo jego dalszego wykorzystywania w oczyszczalniach ścieków.

Racjonalne wykorzystanie biogazu powstającego w procesie beztlenowej stabilizacji osadów ściekowych pozwala na uzyskanie energii cieplnej, mechanicznej i elektrycznej. Energia cieplna wytwarzana w kotłach jest wykorzystywana na cele ogrzewcze zarówno komór fermentacyjnych, jak i pomieszczeń użytkowych. Energia mechaniczna generowana w silnikach gazowych służy do napędzania urządzeń znajdujących się w oczyszczalni. Energia elektryczna natomiast wytworzona jest w silnikach i turbinach gazowych sprzężonych z generatorami prądotwórczymi.

Najlepsze efekty daje skojarzona gospodarka gazem fermentacyjnym, wykorzystująca wytwarzanie energii zarówno do celów napędowych, jak i do celów ogrzewczych.

W celu optymalnego wykorzystywania możliwości, jakie niesie ze sobą wytwarzanie biogazu w procesie fermentacji metanowej niezbędne jest zapoznanie się z instalacjami i urządzeniami do oczyszczania, przesyłania, magazynowania oraz wykorzystywania biogazu. Prawidłowy dobór urządzeń i ich odpowiednia eksploatacja umożliwiają znaczące pokrycie zapotrzebowania oczyszczalni ścieków na energię cieplną i na energię elektryczną.

PIŚMIENNICTWO

- AFGAN N.H., CARVALHO M.G., JOVANOVIC M. 2007. Biomass – fired power plant: the sustainability option. *International Journal of Sustainable Energy* 26: 179 – 193.
- BARTOSZEWSKI K. I IN. 1997. *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*. Wyd. PZiTS, Poznań.
- BARTOSZEWSKI K. 1995. Kontrola przebiegu procesu fermentacji osadów w komorach fermentacyjnych. *Problemy gospodarki osadowej w oczyszczalniach ścieków*. I Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Częstochowa.
- BIEŃ J. 2008. *Osady ściekowe. Teoria i praktyka*. Częstochowa.
- BŁASZCZYK-PASTECZKA A., ŻUKOWSKI W. 2007. Energetyczne wykorzystanie biogazu. *Czasopismo Techniczne* 1: 11–17.
- CUPIAŁ K., MENDERA K.Z. 1996. *Biogazowe zespoły prądotwórcze dla oczyszczalni ścieków*. Materiały z Sympozjum: Nowoczesne technologie i urządzenia dla małych, średnich, dużych oczyszczalni ścieków. Bystra.

- CYWIŃSKI B., GDULA S., KEMPA E. 1972. Oczyszczanie ścieków miejskich. Podstawy technologiczne i zasady projektowania oczyszczalni. Wyd. Arkady, Warszawa.
- DEMIRBAŞ A. 2006. Global renewable energy resources. Energy Sources Part A 28: 779 – 792.
- Dyrektywa 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 r. w sprawie wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych** (Dz. Urz. L 283/33 z dnia 27.09.2001).
- FYTILI D., ZABANIOTOU A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and New methods – a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12: 116 – 140.
- GUNNARSSON C., VÄGSTRÖM L., HANSSON P-A. 2008. Logistic for forage harvest to biogas production – timeliness, capacities and costs. In a Swedish case study. Biomass and Bioenergy 32: 1263 – 1273.
- HEIDRICH Z., NIEŚCIER A. 1999. Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych. PZiTS, Warszawa.
- MELGUIZO F.J., ORTEGA M., CANO A. 2002. Robust control for a gas turbine in biomass – based electric power plants. Energy Sources 24: 591 – 599.
- OH S., LOGAN B.E. 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater Rusing fermentation and microbial fuel cell Technologies. Water Research 39: 4673 – 4682.
- OLESZKIEWICZ J.A. 1998. Gospodarka osadami ściekowymi. Wyd. LEM, Kraków.
- PLAZA G. 1996. Anaerobic treatment of municipal solid. Sci. Technol. P. 3, 33, 169.
- SADECKA Z., MYSZOGRAJ S. 2007. Biogaz – niekonwencjonalne źródło energii w oczyszczalniach ścieków. EkoTechnika 43: 35 – 39.
- SCHUCK S. 2006. Biomass as an energy source. International Journal of Environmental Studies 63: 823 – 835.
- SKALMOWSKI K. I IN. 2006. Poradnik gospodarowania odpadami. Dashofer Holding Ltd. & Wydawnictwo Verlag Dashofer Sp. z o.o., Warszawa.
- STĘPNIAK S. 2006. Energia z oczyszczalni ścieków komunalnych. EkoTechnika 37: 59 – 62.
- SZPARKOWSKA I. 2004. Wykorzystanie biogazu jako niekonwencjonalnego źródła energii na obszarze Polski. EkoTechnika 29: 50 – 53.
- ZHANG G., ZHANG P., YANG J., LIU H. 2008. Energy – efficient sludge sonication: Power and sludge characteristic. Bioresource Technology 99: 9029 – 9031.

www.ilawskiewodociagi.pl

www.ogrzewnictwo.pl