

Dariusz Zdebik, Marcin Głodniok*, Krzysztof Korczak**

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA BIOGAZU DO PRODUKCJI CIEPŁA I ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA PRZYKŁADZIE OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RYBNIKU

Streszczenie

Wykorzystaniem, w możliwe najbardziej efektywny sposób, odnawialnego źródła energii elektrycznej i ciepłej, jakim jest biogaz wytwarzany w procesie fermentacji osadów ściekowych, powinni zajmować się eksploatarzy oczyszczalni ścieków. W artykule przedstawiono charakterystykę stanu istniejącego oczyszczalni ścieków w Rybniku. Przygotowano bilans energetyczny oczyszczalni dla stanu istniejącego, który posłużył do doboru kogeneratora do spalania biogazu. Na podstawie dobranego urządzenia przygotowano bilans energetyczny, uwzględniający całkowite wykorzystanie biogazu (okres letni) lub uzupełnienie niedoborów energii (okres zimowy). Oszacowano efekty ekologiczne i ekonomiczne, jakie przyniesie realizacja inwestycji.

An analysis of biogas utilisation possibilities for production of thermal and electric energy by example of sewage treatment plant in the city of Rybnik

Abstract

The people who exploit sewage treatment plants should take care of the utilisation, in possibly most effective way, of the renewable source of electric and thermal energy, being the biogas produced in the process of sludge fermentation. In the paper, the characteristics of the state existing in the sewage treatment plant in Rybnik has been presented. There has been prepared the energy balance of the sewage treatment plant that had been used to select the co-generator for biogas combustion. On the basis of the equipment selected here, there has been prepared the energy balance taking into account full utilisation of biogas (summer period), or supplement of the energy deficiency (winter period). The ecological and economical effects that will be brought by the realization of an investment have been estimated.

1. WPROWADZENIE DO ZAGADNIEN PROCESU FERMENTACJI

Podstawowymi parametrami decydującymi o prawidłowym przebiegu procesu fermentacji metanowej są przede wszystkim:

- temperatura,
- czas fermentacji (ilość i częstość doprowadzania/odprowadzania osadu),
- odczyn,
- zakres potencjału utleniająco-redukcyjnego,
- zawartość kwasów lotnych,
- zasadowość,
- skład osadu (Imhoff 1996; Miksch i in. 2010).

Optymalne i ekstremalne wartości tych parametrów podano w tablicy 1.

* Główny Instytut Górnictwa

Tablica 1. Podstawowe parametry mezofilowej fermentacji metanowej (Sadecka 2010)

Parametr	Wartość optymalna	Wartość ekstremalna
Temperatura, °C	35 ± 2°C	20–40
Odczyn	6,8–7,4	6,4–7,8
Potencjał utleniająco-redukcyjny, mV	od –520 do –530	od –490 do –550
Lotne kwasy tłuszczowe, mg CH ₃ COOH/dm ³	50–500	> 2000
Zasadowość, mgCaCO ₃ /dm ³	1500–3000	1000–5000

W zamkniętych komorach proces fermentacji metanowej przebiega w trzech fazach (Heirich 2004; Poradnik... 1997):

- faza 1 – bakterie hydrolityczne za pomocą enzymów zewnątrzkomórkowych rozkładają nierozpuszczone związki organiczne zawarte w osadach (np. celuloza, ligniny, białka, tłuszcze) do związków rozpuszczalnych w wodzie (np. kwasy tłuszczowe, alkohole, amoniak),
- faza 2 – zwana fermentacją kwaśną, w której bakterie kwasowe rozkładają rozpuszczone związki do prostych kwasów organicznych, takich jak – kwas octowy, kwas propionowy oraz do wodoru i dwutlenku węgla,
- faza 3 – metabolity fermentacji kwaśnej są substratem dla bakterii metanowych autotroficznych (głównie kwas octowy) oraz dla bakterii metanowych heterotroficznych (wodór i dwutlenek węgla); produktem metabolizmu są metan, dwutlenek węgla i woda.

Ilość wytwarzanego biogazu jest szacowana na poziomie 0,75–1,15 m³/kg s.m.o. usuniętej, zawierającego około 67% metanu i około 30% dwutlenku węgla, parę wodną oraz około 1–2% siarkowodoru. Ilość gazu jest szacowana na poziomie 28 m³/d na 1000 mieszkańców (Poradnik... 1997).

2. CHARAKTERYSTYKA OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W RYBNIKU

2.1. Opis stanu istniejącego

Oczyszczalnia ścieków w Rybniku-Orzepowicach przyjmuje ścieki z mieszanego systemu kanalizacji, który w dużej części ma obecnie charakter ogólnospławny.

Poniżej przedstawiono urządzenia wchodzące w skład linii oczyszczania ścieków, linii przeróbki osadów oraz linii biogazu.

Linia oczyszczania ścieków

Ciąg technologiczny oczyszczania ścieków obejmuje następujące obiekty:

- budynek krat,
- stację zlewną,
- pompownię główną,
- płaskownik,
- budynek separatora piasku,
- koryto pomiarowe,
- trzy osadniki wstępne,
- komorę rozdziału,

- komorę beztlenową,
- pompownię,
- cztery komory osadu czynnego, pracujące w technologii BIODENIPHO[®],
- dystrybutory,
- pięć osadników wtórnych,
- pompownię recyrkulacyjną.

Linia przeróbki osadów

Przeróbka osadu jest prowadzona w następujących obiektach:

- pompownia osadu wstępnego,
- stacja odwadniania osadu,
- zagęszczacz mechaniczny,
- zagęszczacz grawitacyjny,
- budynek operacyjny,
- dwie wydzielone komory fermentacyjne zamknięte WKFZ,
- zbiornik magazynowy osadu.

Linia przeróbki biogazu

- kocioł biogazu,
- pochodnia biogazu.

Do biologicznego oczyszczania zastosowano przepływowo-sekwencyjny proces osadu czynnego BIODENIPHO[®], z wstępną komorą beztlenową i sekwencją faz w reaktorach, dostosowaną do biologicznego usuwania azotu i fosforu. Do funkcji reaktorów biologicznych zostały zaadaptowane cztery (z sześciu istniejących) otwarte komory fermentacyjne o średnicy $D = 25$ m każda i pojemności czynnej 3644 m^3 (łącznie $V = 14\,576 \text{ m}^3$).

W układzie przeróbki osadu zastosowano beztlenową stabilizację wstępnie zagęszczonych osadów oraz końcowe odwadnianie mechaniczne. Po odwodnieniu, osad jest poddawany higienizacji wapnem, a następnie przenośnikiem ślimakowym transportowany do kontenerów, z których jest przewożony na miejsce tymczasowego gromadzenia na terenie oczyszczalni. Osad z terenu oczyszczalni jest wywożony dwa razy w roku.

Biogaz powstający w procesie fermentacji głównie jest spalany w kotle, a jego nadmiar jest kierowany do spalania w pochodni. Spalany biogaz nie jest odsiarczany, przez co powoduje korozję kotła oraz pochodni. Ciepło ze spalania biogazu w kotle, jest wykorzystywane w celu podgrzewania wody, która przez wymiennik ogrzewa osad (recyrkulujący lub doprowadzany nadmierny) do wymaganej temperatury 35°C , w której jest prowadzony proces fermentacji. Czas fermentacji osadu wynosi 20 dni. Biogaz spalany w kotle jest wykorzystywany w 33% w okresie letnim oraz 87% w okresie zimowym, pozostała ilość jest kierowana do pochodni i tam spalana.

Do ogrzewania budynku administracyjnego jest używany węgiel spalany w kotle węglowym.

Do sterowania i kontrolowania pracy oczyszczalni jest wykorzystywany komputerowy system SCADA, który umożliwia bieżącą kontrolę pracy oczyszczalni oraz gromadzi i przechowuje dane, a także sygnalizuje sytuacje i stany awaryjne.

2.2. Bilans energetyczny oczyszczalni – stan obecny

Energia elektryczna jest zużywana w oczyszczalni w Rybniku do zaspokajania następujących potrzeb:

- utrzymywanie pracy obiektów oczyszczalni (pompowanie ścieków, mieszanie itp.), na którą praktycznie przypada największa część pobieranej mocy,
- przygotowywanie ciepłej wody użytkowej w budynku administracyjnym, w warsztatach, budynku odwadniania, kotłowni gazowej, budynku operacyjnym,
- dogrzewanie obiektów w przypadku spadku temperatury poniżej 0 stopni Celsjusza: budynek stacji zlewczej, budynek krat, budynek separatora piasku, stacje transformatorowe,
- oświetlenie zewnętrzne.

Obecnie do oczyszczalni trafia strumień ścieków $V_s = 14\,000\text{ m}^3/\text{d}$, z którego otrzymuje się gaz w ilości $V_g = 1410\text{ m}^3/\text{d}$. Oszacowany na tej podstawie wskaźnik powstawania gazu wynosi

$$v_g = \frac{V_g}{V_s} = \frac{1410}{1400} = 0,101\text{ m}_n^3/\text{m}^3$$

Dla planowanej ilości ścieków $V_s = 21\,000\text{ m}^3/\text{d}$, pozyskiwana ilość gazu wyniesie

$$V_g = V_s v_g = 0,101 \cdot 21000 = 2115\text{ m}_n^3/\text{d}$$

Poniżej przedstawiono charakterystykę gazu wytwarzanego w WKFz w oczyszczalni ścieków w Rybniku:

- CO_2 – 35,2%,
 - O_2 – 0,4%,
 - CH_4 – 63,6%,
 - N_2 – 0,8%,
 - H_2S – $15,52\text{ g}/100\text{ m}_n^3 = 155,2\text{ mg}/\text{m}_n^3$,
 - wartość opałowa: $22,78\text{ MJ}/\text{m}_n^3$,
 - liczba Wobbego: $26,730\text{ MJ}/\text{m}_n^3$,
- obecnie gaz nie jest odsiarczany.

Teoretyczna moc zawarta w strumieniu gazu wynosi: $P = 558\text{ kW}$.

Dodatkowym źródłem energetycznym w oczyszczalni w Rybniku jest węgiel kamienny, którego zużycie w ostatnich latach kształtowało się na poziomie od 47 do 67 Mg/rok. Węgiel w całości jest wykorzystywany jako paliwo i spalany w piecu instalacji centralnego ogrzewania w budynku administracyjnym oczyszczalni oraz w przyległym budynku, w którym znajdują się warsztaty.

Bilans energii obecnie zużywanej na cele nietechnologiczne przedstawia się następująco:

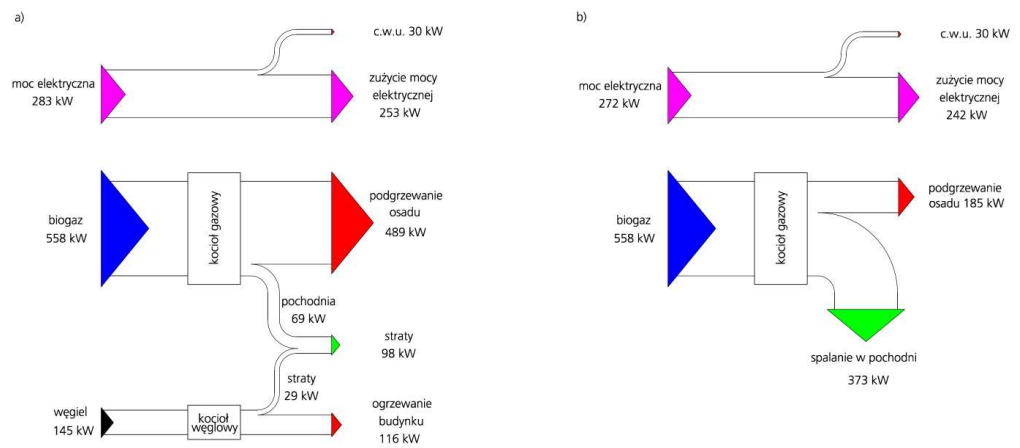
- w celu podgrzania c.w.o. w termach zasilanych energią elektryczną w obiektach takich, jak: stacja zlewcza, budynek separatora piasku, kotłownia biogazu, budynek operacyjny, stacja odwadniania, warsztaty oraz podgrzewacz ciepłej wody w budynku administracyjnym:
 - moc zainstalowana 20 kW + 24 kW (bojler) daje zapotrzebowanie dzienne około 232 kWh/d, co w ujęciu rocznym daje 84 680 kWh/rok;
- w celu dogrzania w okresie zimowym obiektów takich, jak: budynek krat, stacja zlewcza, budynek separatora piasku, stacja odwadniania, stacje transformatorowe, grzejnikami olejowymi i nagrzewnicami zasilanymi elektrycznie:
 - moc zainstalowana 70 kW wykorzystywana w 50% daje zapotrzebowanie w okresie zimowym dzienne około 840 kWh/d, co w danym sezonie daje 102 480 kWh/rok;
- oświetlenie zewnętrzne:
 - moc zainstalowana 16,8 kW przy założeniu 10 h oświetlania oczyszczalni w ciągu roku daje 61 320 kWh/rok.

Obecne potrzeby energetyczne zakładu są następujące:

- zapotrzebowanie na moc cieplną do ogrzania osadu:
 - w zimie: $Q_z = 489$ kW,
 - latem: $Q_l = 185$ kW;
- zapotrzebowanie na moc elektryczną:
średnie zużycie miesięczne energii elektrycznej dla okresu zimowego (przyjęto miesiące I–III i X–XII) i letniego (miesiące IV–IX) oszacowano (w oparciu o dane eksploatacyjne z 2007 r.) na poziomie:
 - zima: $E_{elz} = 207\,133$ kWh,
 - lato: $E_{ell} = 198\,941$ kWh;
 - co w przeliczeniu na zapotrzebowanie mocy wynosi:
 - zima: $N_{el} = 283$ kW,
 - lato: $N_{el} = 272$ kW.

W zimie budynek administracyjny i warsztat są ogrzewane ciepłem wytwarzanym w kotle węglowym. Przyjęto, że zużycie węgla wynosi około 60 Mg rocznie.

Zużycie mocy w oczyszczalni w okresie zimowym i letnim przedstawiono na rysunku 1. Bilans przedstawiono na wykresach Sankeya.



Rys. 1. Zużycie mocy w oczyszczalni w zimie (a) i latem (b) – stan obecny

Fig. 1. Power consumption in the treatment plant in the winter (a) and in the summer (b) periods – the current state

2.3. Propozycja modernizacji węzła biogazu

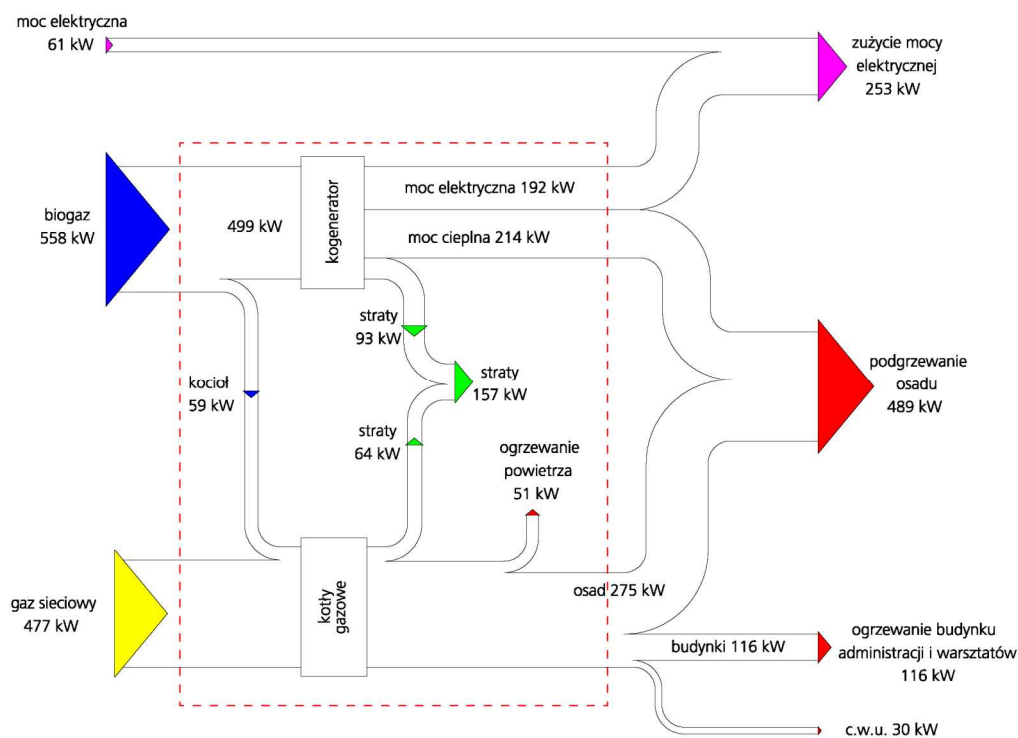
W celu modernizacji układu proponuje się zastąpienie dotychczasowego kotła gazowego silnikiem gazowym (kogeneratorem) wytwarzającym w skojarzeniu ciepło i energię elektryczną. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w tego typu układach dochodzi do 40%, a sumaryczna sprawność wynosi około 90% (Zdebik i in. 2008). Przyjmując sprawności podane w ofercie producenta kogeneratora:

- sprawność wytwarzania ciepła $\eta_c = 0,487$,
- sprawność wytwarzania energii elektrycznej $\eta_{el} = 0,384$,
- całkowita moc kogeneratora $P = 499$ kW,

można uzyskać następujące ilości mocy:

- moc cieplna $Q_c = 243$ kW,
- moc elektryczna $N_{el} = 192$ kW.

Bilans mocy w okresie zimowym z uwzględnieniem wykorzystania energii zawartej w biogazie przedstawiono na rysunku 2. Jako dane wejściowe przyjęto zapotrzebowanie na moc elektryczną i cieplną zakładu oraz przyjętą moc cieplną i elektryczną kogeneratora. W instalacji jest planowane spalanie biogazu także w kotłach w sytuacji wystąpienia awarii lub postoiu kogeneratora, lub gdy urządzenie to nie będzie w stanie spalić całego strumienia biogazu. Linia przerywaną zaznaczono przemiany mocy zachodzące w projektowanym budynku technicznym. Część ciepła wytwarzanego w kotłach będzie wykorzystywana do podgrzania powietrza podawanego do pomieszczenia tak, aby zapewnić jego temperaturę min. 10°C. Na przedstawione na rysunku 2 straty ciepła składa się w większości entalpia spalin z kogeneratora i kotłów gazowych; nadmiar ciepła będzie usunięty z pomieszczeń przez układy wentylacji (Zdebik i in. 2008).



Rys. 2. Bilans mocy dla okresu zimowego z uwzględnieniem zabudowy kogeneratora

Fig. 2. Power balance for the winter period with taking into consideration of the building development of co-generator

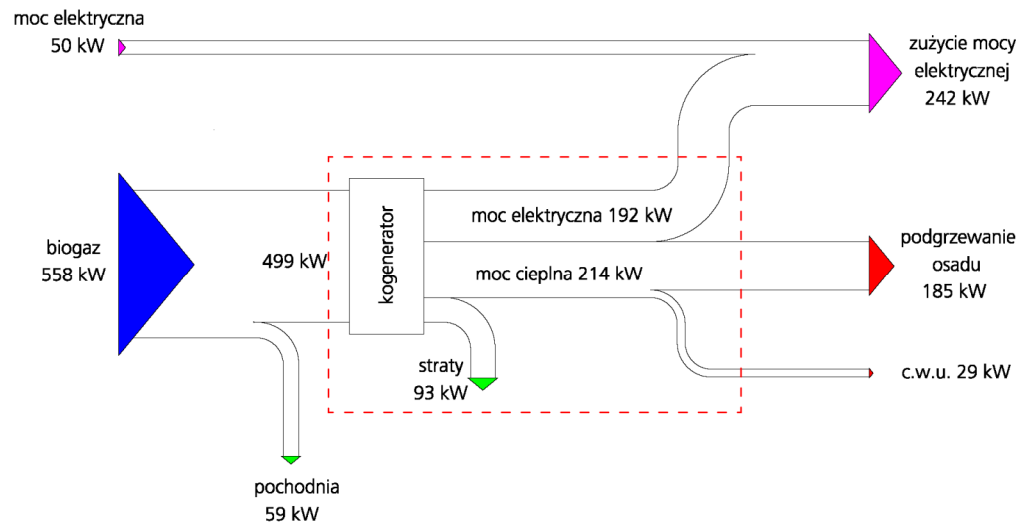
Bilans mocy dla okresu letniego przedstawiono na rysunku 3. W okresie zimowym zakłada się wyłączenie kotłów gazowych, a ewentualny nadmiar biogazu byłby spalany w pochodni. W przypadku mniejszego zapotrzebowania na ciepło do podgrzania osadu, jego nadmiar będzie zrzucany do otoczenia za pomocą chłodnicy wentylatorowej. Podobnie, jak w poprzednim przypadku, na ciepło strat z kogeneratora składa się entalpia spalin usuwanych przez komin, pozostały nadmiar ciepła będzie usunięty z pomieszczeń przez układy wentylacji (Zdebik i in. 2008).

W branży elektrycznej sumaryczne moce pomocniczych napędów technologicznych (pompy, wentylatory, dmuchawy) wynoszą:

- moc zainstalowana $P_{it} = 17$ kW,
- moc zapotrzebowana $P_{zt} = 12$ kW.

Sumaryczne moce odbiorców elektrycznej instalacji ogólnobudowlanej (oświetlenie, grzejniki elektryczne, zestaw remontowy gniazd wtyczkowych) wynoszą:

- moc zainstalowana $P_{io} = 10$ kW,
- moc zapotrzebowana $P_{zo} = 6$ kW.



Rys. 3. Bilans mocy dla okresu letniego z uwzględnieniem zabudowy kogeneratora

Fig. 3. Power balance for the summer period with taking into consideration of the building development of co-generator

W tabelicy 2 przedstawiono parametry sprawności energetycznej urządzeń.

Tablica 2. Parametry sprawności energetycznej urządzeń

Lp.	Urządzenie	Sprawność	Moc zainstalowana, kW	Zasilanie	Ilość
1	Kogenerator	0,385 (elektryczna) 0,429 (cieplna)	192 (elektryczna) 214 (cieplna)	Biogaz	1
2	Kocioł gazowy	0,88	320	Gaz E	2

W tabelicy 3 przedstawiono obiekty, które będą wchodziły w skład linii ujmowania i przeróbki biogazu.

Tablica 3. Bilans urządzeń

Obiekt	Przeznaczenie, główne parametry
Budynek technologiczny	Budynek z dwoma pomieszczeniami mieszczącymi kogenerację i dwa kotły gazowe. Powierzchnia użytkowa budynku 61,87 m ² .
Zbiornik biogazu	Zbiornik niskociśnieniowy z tworzywa elastycznego na biogaz. Pojemność użytkowa 500 m ³ .
Zbiornik odsiarczania biogazu	Cylindryczny niskociśnieniowy zbiornik stalowy z dachem stożkowym wyłapujący siarkowodór na rudzie damiowej. Pojemność 6 m ³ .
Studnia kondensatu	Żelbetowa studnia prefabrykowana z włazem rewizyjnym, służąca do schładzania i odwadniania biogazu. Pojemność użytkowa studni V = 3,5 m ³ .
Dmuchawa biogazu wraz z wiatą	Dmuchawa pokonująca opory ciśnienia przepływu biogazu w instalacji i zapewniająca właściwe podawanie go do generatora.

Podczas realizacji inwestycji będą wykonane sieci ciepłownicze, wodne, kanalizacyjne i elektryczne oraz drogi, place i chodniki (Wstępny projekt... 2009).

3. EFEKTY EKOLOGICZNE I EKONOMICZNE INWESTYCJI

Po zmodernizowaniu układu zmniejszą się opłaty za energię elektryczną. Spadnie zapotrzebowanie na moc elektryczną z 253 do 61 kW w okresie zimowym (spadek o prawie 76%) oraz z 242 do 50 kW w okresie letnim (spadek prawie o 80%). Ponadto, zostanie zlikwidowana kotłownia węglowa zużywająca 60 Mg węgla rocznie. Pojawią się natomiast koszty związane z zakupem gazu ziemnego w okresie zimowym, którego zużycie dla szacowanych wielkości bilansowych wyniesie około 23 m³/h.

W Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z 26 września 2007 r. (Dz. U. nr 185, poz. 1314) podano sposób obliczania oszczędności energii pierwotnej, oznaczonej symbolem PES (*Primary Energy Saving*). Określa on procentowo oszczędność energii pierwotnej wykorzystanej w procesie skojarzonym do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w stosunku do energii pierwotnej potrzebnej do wytworzenia tych samych ilości energii elektrycznej i ciepła, wytwarzanych w dwóch procesach rozdzielnych. Danymi wejściowymi do obliczania wskaźnika PES są sprawności wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w układzie skojarzonym i referencyjne sprawności układów rozdzielonych. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej dla przyjętych danych wynosi $\eta_{el} = 38,5\%$, a energii w postaci ciepła $\eta_c = 42,9\%$. Sprawność układów referencyjnych, zgodnie z Rozporządzeniem, w przypadku wytwarzania energii elektrycznej, wynosi $\eta_{ref\ el} = 42\%$, a dla wytwarzania ciepła $\eta_{ref\ c} = 70\%$. Wskaźnik PES obliczony zgodnie z §7.1 Rozporządzenia, wynosi 34,6%. Oznacza to, że produkcja energii elektrycznej i ciepła w kogeneratorze zużywa 34,6% mniej biogazu w stosunku do ilości potrzebnej do wytwarzania tych samych ilości energii elektrycznej i ciepła w dwóch oddzielnych procesach.

Grzejniki elektryczne zainstalowane w budynku będą wykorzystywane tylko w trakcie postoju i remontów, a zainstalowane w nich urządzenia termostatyczne pozwolą na oszczędność energii elektrycznej.

W instalacji oświetlenia wnętrzego będą zastosowane oprawy fluorescencyjne wyposażone w stateczniki elektroniczne. W takim przypadku użytkownik uzyska oszczędność około 20% zużycia energii elektrycznej w stosunku do systemu wyposażonego w stateczniki elektromagnetyczne.

Oczyszczalnia ścieków jest źródłem emisji zanieczyszczeń pochodzących z procesu spalania biogazu w kotle grzewczym w celu ogrzania osadów, z pochodni oraz z kotła opalanego węglem w budynku biurowym.

Wielkość emisji zależy od ilości i rodzaju spalanej paliwa. Po modernizacji źródłami emisji zanieczyszczeń w procesie energetycznego spalania paliw oczyszczalni ścieków będzie kogenerator, czyli silnik Diesla opalany biogazem. Kotły znajdujące się w kotłowni grzewczej będą opalane gazem wysokometanowym i/lub biogazem. Dla silników Diesla nie ma ustalonych standardów emisji i przyjmuje się wielkości podane przez producenta silnika, czyli wielkość emisji nie przekroczy:

- 500 mg/Nm³ w przypadku dwutlenku azotu,
- 1000 mg/Nm³ w przypadku tlenku węgla.

Spalanie biogazu w kogeneratorze umożliwi bezpieczne wykorzystanie właściwości energetycznych substancji odpadowej, jaką jest biogaz i zmniejszenie wielkości

emisji zanieczyszczeń pyłowych oraz dwutlenku siarki odprowadzanych do powietrza. Poprawią się warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu.

PODSUMOWANIE

Kompleksowa modernizacja węzła zagospodarowania i wykorzystania energetycznego biogazu przyniesie następujące efekty ekologiczne:

- likwidację kotłowni węglowej oraz zmniejszenie emisji niskiej pochodzącej ze spalania węgla kamiennego; dodatkowo zostanie wyeliminowane składowanie popiołów,
- oczyszczanie biogazu z siarki w instalacji odsiarczania, przed skierowaniem do spalania,
- kontrola gospodarki wytwarzanym biogazem przez magazynowanie go w zbiorniku lub kierowanie bezpośrednio do spalania,
- wykorzystanie energii zawartej w biogazie do wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej,
- zmniejszenie ilości energii elektrycznej pobieranej przez oczyszczalnię z sieci energetycznej,
- zmniejszenie ilości emitowanych gazów cieplarnianych przez wyeliminowanie ciągłego używania pochodni (ograniczenie pracy jedynie do stanów awaryjnych systemu).

Negatywne strony wykorzystywania biogazu w układzie kogeneracyjnym to, między innymi:

- powstawanie dodatkowej emisji zanieczyszczeń do powietrza atmosferycznego pochodzących ze spalania gazu ziemnego (okresy zimowe),
- wzrost poziomu hałasu spowodowany pracą kogeneratora (cały rok) oraz chłodnicy wentylatorowej (latem),
- odprowadzanie nadmiaru ciepła do atmosfery latem (chłodnice wentylatorowe).

Dodatkowe efekty związane z wykorzystaniem biogazu do wytwarzania energii ciepłej i elektrycznej to:

- obniżenie kosztów zakupu energii elektrycznej,
- brak konieczności zakupu węgla, wywozu popiołu oraz obsługi kotła węglowego,
- możliwość lepszej regulacji temperatury w instalacji c.o. – obniżenie kosztu energii ciepłej,
- wolniejsze zużycie kotła gazowego ze względu na obniżenie zawartości siarki w biogazie,
- brak konieczności utrzymywania rezerwowego paliwa, jakim jest obecnie olej opałowy,
- produkcja zielonej energii,
- w przypadku awarii zewnętrznego zasilania w energię elektryczną, będzie istniała możliwość zasilania minimalnej ilości urządzeń oczyszczalni (praca wyspowa), niezbędnych do zabezpieczenia przed ewentualnym skażeniem środowiska (katastrofa ekologiczna).

Literatura

1. Heirich Z. (2004): *Kanalizacja*. Warszawa, Wydaw. Szkolne i Pedagogiczne.
2. Imhoff K., K.R. (1996): *Kanalizacja miasta i oczyszczanie ścieków*. Bydgoszcz, Wydaw. Projprzem-EKO.
3. Miksch K. i inni (2010): *Biotechnologia ścieków*. Warszawa, PWN.
4. *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków* (1997): Poznań, Wydaw. PZiTS.
5. Sadecka Z. (2010): *Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków*. Warszawa, Wydaw. Seidel-Przywecki Sp. z o.o.
6. Wstępny projekt technologiczny modernizacji układu energetycznego w Oczyszczalni ścieków w Rybniku (2009): Gliwice, Energoprojekt.
7. Zdebik D. i inni (2008): *Wytyczne programowania modernizacji układów technologicznych oczyszczalni ścieków w aspekcie bilansu energetycznego oczyszczalni*. Praca statutowa GIG (niepublikowana).
8. Zdebik D. i inni (2009): *Model komputerowy technologii oczyszczania ścieków wraz z wytycznymi wspomaganiami decyzji*. Praca statutowa GIG (niepublikowana).
9. Zdebik D. i inni (2010): *Studium wykonalności dla zadania: Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii na terenie oczyszczalni ścieków w Rybniku-Orzepowicach poprzez skojarzoną produkcję ciepła i energii elektrycznej z biogazu*. Katowice, GIG (niepublikowane).
10. Zdebik D., Korczak K., Bondaruk J. (2009): *Zasady optymalizacji technologii oczyszczania ścieków z uwzględnieniem rozbudowy systemu kanalizacyjnego*. IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne w dobie współczesnych problemów”, Szczyrk, AQUA SA.

Publikacja powstała w ramach działalności statutowej GIG 14010180-344: „Optymalizacja procesu oczyszczania ścieków przy minimalizowaniu kosztów eksploatacyjnych wynikających z wprowadzenia urządzeń energooszczędnych i zagospodarowaniu powstających odpadów”.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Barbara Białecka