

## ANALIZA GOSPODARKI OSADOWEJ I BIOGAZOWO-ENERGETYCZNEJ W OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW W OPOLU

Paulina Szczyrba<sup>1</sup>, Adam Masłoń<sup>1\*</sup>, Joanna Czarnota<sup>1</sup>, Kamil Olszewski<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Politechnika Rzeszowska, Zakład Inżynierii i Chemii Środowiska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

<sup>2</sup> Wodociągi i Kanalizacja w Opolu Sp. z o.o., ul. Oleska 64, 45-222 Opole

\* Autor do korespondencji e-mail: amaslon@prz.edu.pl

### STRESZCZENIE

Zwiększające się wymagania oczyszczania ścieków oraz rozwój systemów oczyszczania ścieków, unieszkodliwiania i przeróbki osadów ściekowych powodują znaczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepłą. Alternatywnym sposobem na pozyskiwanie taniej energii jest wykorzystywanie biogazu wytworzonego w procesie fermentacji z osadów ściekowych. W pracy przedstawiono analizę gospodarki osadowej i biogazowo-energetycznej w oczyszczalni ścieków w Opolu w aspekcie uzyskiwania biogazu i jego wykorzystania do produkcji energii elektrycznej. Układ biogazowo-energetyczny w rozpatrywanym okresie funkcjonował prawidłowo. W dwóch agregatach prądowców wyprodukowano z biogazu łącznie 7,26 GWh energii elektrycznej, co pozwoliło na pokrycie blisko 35% zapotrzebowania na energię elektryczną.

**Słowa kluczowe:** osady ściekowe, fermentacja beztlenowa, biogaz, energochłonność oczyszczalni ścieków

### ANALYSIS OF SEWAGE SLUDGE AND BIOGAS-ENERGY MANAGEMENT AT THE OPOLE WASTEWATER TREATMENT PLANT

#### ABSTRACT

Increasing requirements of wastewater treatments and the development of wastewater treatment and sewage sludge systems cause a significant increase in the demand for electricity and heat. An alternative way to obtain cheap energy is to use biogas produced in the anaerobic digestion process from sewage sludge. The paper presents an analysis of sewage sludge and biogas-energy management at the wastewater treatment plant in Opole in the aspect of obtaining biogas and its use for electricity production. The biogas-energy system was functioning properly in 2017–2019. A total of 7.26 GWh of electricity was produced from biogas in two power generators, which allowed to cover nearly 35% of the demand for electricity.

**Keywords:** sewage sludge, anaerobic digestion, biogas, energy consumption of wastewater treatment plant

#### WPROWADZENIE

Zwiększające się wymagania oraz rozwój systemów oczyszczania ścieków, unieszkodliwiania i przeróbki osadów ściekowych powodują znaczny wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepłą. Coraz częstszą alternatywą na pozyskiwanie taniej energii jest wykorzystywanie energii zawartej w biogazie z osadów ściekowych. Pozyskiwanie biogazu możliwe jest dzięki fermentacji metanowej. Jest ona

jedną z najstarszych metod stabilizacji osadów ściekowych prowadzoną dawniej w osadnikach Imhoffa, a obecnie w wydzielonych komorach fermentacyjnych (WKF). Tam pod wpływem odpowiedniej temperatury (35–38 °C) w warunkach beztlenowych następuje fermentacja. Biogaz jest głównym produktem procesu fermentacji, który może być wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej (do podgrzewania budynków technicznych, suszarni i wydzielonych komór fermentacyjnych), do

zasilania jednostek CHP (ang. *combined heat and power*), jako paliwo do silników trakcyjnych, a także w procesach technologicznych, np. do produkcji metanolu. Energia zawarta w 1 m<sup>3</sup> biogazu odpowiada energii uzyskiwanej z 0,6 m<sup>3</sup> gazu ziemnego, 0,65 dm<sup>3</sup> oleju napędowego, 0,81 kg węgla. Nie mniej jednak, znaczenie ekologiczne biogazu jest niewspółmierne z innymi rodzajami paliw. Największą rolę w bilansie energetycznym odgrywa wykorzystanie biogazu jako wewnętrzne zużycie ciepła w wydzielonych komorach fermentacyjnych. Powoduje to, że wyprodukowany biogaz zostaje wykorzystany na miejscu. Dopiero nadwyżka energii może zostać przeznaczona na inne potrzeby oczyszczalni lub zostać sprzedana [Heidrich i in. 2011, Kołodziejak 2012, Krupa 2015, Iżewska i Szaflik 2016, ETV4WATER Raport 2017, Grübel i Machnicka 2020].

Energochłonność oczyszczalni ścieków komunalnych jest bardzo zróżnicowana. Zależy ona od zastosowanego systemu i układu technologicznego oraz urządzeń elektrycznych. Największe zapotrzebowanie na energię obserwuje się jednak w biologicznych procesach oczyszczania ścieków [ETV4WATER Raport 2017, Orchowski i in. 2018]. W systemach wykorzystujących osad czynny zużycie energii do napowietrzania bioreaktorów oscyluje na poziomie 50–60%, a czasami sięga nawet poziomu 60–80% [Bodík i Kubská 2013, Henriques i Catarino 2017, Orchowski i in. 2018]. Oczyszczalnie ścieków prowadzące proces fermentacji beztlenowej zużywają o około 40% mniej energii netto aniżeli oczyszczalnie nie wykorzystujące osadów ściekowych do produkcji biogazu. Potencjał energetyczny biogazu o zawartości metanu na poziomie ok. 60% wynosi 6,5 kWh/m<sup>3</sup> [ETV4WATER Raport 2017]. Wartość energii zgromadzonej w ściekach może wahać się nawet od 4,92 do 7,97 kWh/kg ChZT i tym samym przekraczać zapotrzebowanie energetyczne na ich oczyszczenie [Heidrich i in. 2011]. Ponieważ skład chemiczny biogazu zależy m.in. od rodzaju dopływających ścieków, wartość opałowa osadów ściekowych nigdy nie będzie taka sama i będzie zależeć przede wszystkim od rodzaju technologii, w której realizowany jest proces ich monospalania [Kołodziejak 2012, Krupa 2015].

Celem pracy jest analiza gospodarki osadowej i biogazowo-energetycznej w oczyszczalni ścieków w Opolu dla okresu od 1 stycznia 2017 r. do 30 września 2019 r.

## OBIEKT BADAŃ

Mechaniczno-biologiczna oczyszczalnia ścieków w Opolu przeznaczona jest do oczyszczania ścieków komunalnych w ilości  $Q_{d\text{sr}} = 45\ 000$  m<sup>3</sup>/d,  $Q_{h\text{max}} = 3\ 750$  m<sup>3</sup>/h oraz 225 000 RLM. Układ oczyszczalni ścieków od początku istnienia tj. od 1908 roku, był wielokrotnie modyfikowany i modernizowany. Oczyszczalnia ścieków została bowiem wybudowana w 1908 r. Obecnie przepływ średni dobowy wynosi ok. 30 000 m<sup>3</sup>/d. Aktualnie obiekt jest poddawany modernizacji w ramach projektu „Kompleksowa modernizacja oczyszczalni ścieków w Opolu wraz z poprawą gospodarki wodno-ściekowej” finansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Projekt realizowany jest w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2014–2020, oś priorytetowa II „Ochrona środowiska, w tym adaptacja do zmian klimatu” – Działanie 2.3 „Gospodarka wodno-ściekowa w aglomeracjach”. Całkowita wartość Projektu brutto: 207 888 162,36 PLN. Wysokość dofinansowania: 103 659 191,69 PLN, z czego wartość inwestycyjna projektu modernizacji oczyszczalni ścieków w Opolu to 170 705 550,00 PLN brutto. Przewidywany termin zakończenia modernizacji planuje się w roku 2022.

Ciąg technologiczny oczyszczalni ścieków w Opolu obejmuje mechaniczne oczyszczanie ścieków z wykorzystaniem kraty rzadkiej, dwóch krat bębnowych, dwóch piaskowników poziomych i jednego osadnika radialnego wstępnego o średnicy 28 m. Dodatkowo oczyszczalnia wyposażona jest w trzykomorowy zbiornik retencyjny ścieków o objętości około 1 500 m<sup>3</sup>. Proces biologicznego oczyszczania ścieków polega na zintegrowanym usuwaniu węgla, azotu i fosforu w układzie składającym się z dwóch komór beztlenowych o pojemności 2 925 m<sup>3</sup> każdy oraz czterech zbiorników osadu czynnego (dwa zbiorniki posiadają konstrukcję radialną o średnicy 40 m i pojemności 4 750 m<sup>3</sup> każdy i dwa zbiorniki o kształcie prostokątnym o pojemności 3 400 m<sup>3</sup>). Zbiorniki osadu czynnego są cyklicznie napowietrzane i mieszane, efektem czego jest usuwanie azotu ze ścieków na drodze nityfikacji i denityfikacji. Przykładowy układ programu pracy zbiornika składa się z 12 godzin napowietrzania (nityfikacja), 4 godzin napowietrzania i mieszania oraz 8 godzin mieszania (denityfikacja). Do zbiorników osadu czynnego dawkowany jest koagulant do chemicznego strącania fosforu oraz

dodatkowe źródło węgla organicznego. Rozdział oczyszczonych ścieków od osadu czynnego następuje w czterech osadnikach wtórnych radialnych o średnicy 40 m i objętości czynnej 3 720 m<sup>3</sup> każdy. Oczyszczone ścieki odprowadzane są do rzeki Odra w km 153+460.

Część osadowa oczyszczalni w Opolu opiera się na grawitacyjnym zagęszczaniu osadu wstępnego, mechanicznym zagęszczeniu osadu nadmiernego, beztlenowej stabilizacji osadu zmieszanego w wydzielonych komorach fermentacji oraz odwadnianiu i suszeniu osadu. Ciąg technologiczny przeróbki osadów ściekowych można opisać w następujący sposób:

- osad z osadnika wstępnego przepływa do komory mieszania osadów - zbiornika o pojemności czynnej ok. 150 m<sup>3</sup>, którego celem jest grawitacyjne zagęszczanie,
- osad nadmierny jest odbierany z rurociągu recyrkulacji osadu przewodem osadu nadmiernego i odprowadzany do zagęszczenia w budynku zagęszczania osadu. Znajduje się tam instalacja trzech mechanicznych zagęszczarek osadu Trickener DR 40 firmy Kruger o wydajności 83 m<sup>3</sup>/h. Do kondycjonowania osadu stosowany jest polielektrolit w ilości do 12 g/kg s.m. (50% aktywności; średnio 8 g/kg s.m.),
- w komorze mieszania osadów można mieszać osad nadmierny zagęszczony z osadem wstępnym lub alternatywnie prowadzić tylko oddzielne zagęszczanie osadu wstępnego; ze względu na problemy techniczne komorę mieszania osadu wykorzystuje się jako zagęszczacz osadu,
- osad przed poddaniem do fermentacji jest rozdrabniany w maceratorze firmy Boerger typ HPL-200,
- zagęszczony osad podawany jest do instalacji podgrzewania osadu zlokalizowanej w budynku kotłowni i wymiennikowi,
- osad podgrzany w wymiennikach, wymieszany z osadem obiegowym instalacji fermentacji jest następnie doprowadzany do zamkniętych komór fermentacyjnych WKF o pojemności czynnej 4 629 m<sup>3</sup> oraz 1 770 m<sup>3</sup>, wyposażonych w mieszadła mechaniczne dwuśmigłowe, czas fermentacji wynosi od 13 do 15 dni,
- do osadu podawane są środki mikrobiologiczne, mające na celu zwiększenie uzysku biogazu oraz higienizację osadu,
- osad przefermentowany odpływa z WKF-ów poprzez przepompownię do instalacji odwadniania,
- powstały w czasie procesu fermentacji biogaz jest odsiarczany metodą BIOSULFEX®, używa się siarkę w postaci pulpy o składzie ok. 60% wody, 35% siarki elementarnej i ok. 4% popiołu,
- nierównomierność produkcji biogazu kompensowana jest w dwupowłokowym zbiorniku biogazu o pojemności 1 530 m<sup>3</sup>, a nadmiar biogazu spalany w pochodni,
- odsiarczony biogaz wprowadzany jest do instalacji agregatów prądotwórczych. W oczyszczalni od 2009 r. pracują 2 agregaty prądotwórcze firmy MTU Onsite Energy, Augsburg. Mogą one pracować wykorzystując zarówno biogaz, jak i gaz ziemny. Pierwszy z agregatów stanowi MBk3042 L5 (90/70 st. C), typ spalania: silnik gazowy z zapłonem iskrowym, dla którego zużycie biogazu wynosi 173,6 m<sup>3</sup>/h, natomiast zużycie gazu ziemnego 99,5 m<sup>3</sup>/h, moc urządzenia wynosi 370 kW, a moc cieplna 426 kW. Drugim agregatem jest MBk3066 L4 (90/70 st. C), typ spalania: silnik gazowy z zapłonem iskrowym. W przypadku tego urządzenia zużycie biogazu wynosi 90,7 m<sup>3</sup>/h, zużycie gazu ziemnego 50,6 m<sup>3</sup>/h, moc urządzenia 192 kW, natomiast moc cieplna 214 kW,
- osad przefermentowany z komór WKF doprowadzany jest do stacji odwadniania, w której zlokalizowano trzy wirówki ANDRITZ typ D4LC30C/HP. Zadaniem stacji odwadniania jest zmniejszenie uwodnienia osadu z 98% do ok. 74%. Wydajność stacji odwadniania osadu wynosi 26 – 30 m<sup>3</sup>/h. Istnieje możliwość dodatkowej doraźnej higienizacji osadów wapnem z urządzenia do dozowania wapna,
- osad odwodniony może być kierowany do zbiorników nadawy osadu dla linii suszarniczej nr 1 i nr 2 lub do kontenerów na osad odwodniony, a następnie przekazywany odbiorcom zewnętrznym do zagospodarowania,
- osad odwodniony ze stacji odwadniania osadu kierowany jest do dwóch niezależnych ciągów suszenia osadu. Zadaniem stacji suszenia osadu jest zmniejszenie uwodnienia osadu z 74% do 10 – 30 %. Możliwy roczny przerób osadu o uwodnieniu 75% wynosi 16 000 Mg/rok. Godzinowy wydatek stacji wynosi 2 m<sup>3</sup>/h. Pierwszym elementem każdego z ciągów jest zbiornik z ruchomym dnem mogący zmagazy-

nować osad w ilości zapewniającej około jednodobową pracę. Ze zbiornika osad tłoczony jest poprzez wyłaczarkę na taśmę urządzenia suszącego. Taśma transportuje osad do strefy suszenia, gdzie za pomocą gorącego powietrza usuwana jest z niego woda. Powietrze przepływające przez instalację do suszenia absorbuje wodę zawartą w osadzie w wyniku czego spada jego temperatura a wzrasta wilgotność. W celu uzyskania optymalnego bilansu energetycznego procesu suszenia większość powietrza procesowego jest recyrkulowana. Niewielka część powietrza procesowego (ok. 5-10%) jest odprowadzana z układu i zastępowana powietrzem zewnętrznym. Powietrze to poprzez układ odzysku ciepła kierowane jest do układu oczyszczania, w którego skład wchodzi płuczki (skruber chemiczny i chłodzący) i biofiltr. Wydzielające się w procesie suszenia kondensaty i odcieki kierowane są do kanalizacji zakładowej. Dla potrzeb odparowania wody zawartej w osadzie w zastosowano stację agregatów kogeneracyjnych i kocioł gazowy. Roczne zapotrzebowanie na energię cieplną wynosi 11.556.000 kWh/rok (przy suszeniu do 90% s.m.). Czynnikiem grzewczym dla powietrza procesowego jest ciepło z chłodzenia agregatów kogeneracyjnych zasilanych gazem ziemnym. W sytuacjach awaryjnych, możliwe jest wykorzystanie, jako źródła ciepła, kotła gazowego. Ogrzewanie powietrza odbywa się na wymiennikach ciepła. Poza tym stacja ta wytwarza energię elektryczną, która wykorzystywana jest na potrzeby własne suszarni, a jej nadmiar kierowany do wykorzystania w procesach oczyszczania ścieków.

- osad wysuszony z obu linii kierowany jest do podajnika ślimakowego rewersyjnego, który może go podawać do kontenera w pomieszczeniu zbiorników osadu (w przypadku niedostatecznego wysuszenia) lub poprzez kruszarkę do instalacji silosa wydawczego dla transportu kołowego (naczepy ciężarówek)

## METODYKA BADAŃ

Analiza gospodarki osadowej i biogazowo-energetycznej w oczyszczalni ścieków w Opolu została przeprowadzona na podstawie wyników eksploatacyjnych dla okresu od 1 stycznia 2017 roku do 30 września 2019 r. Dokonano analizy ilości powstających osadów ściekowych oraz

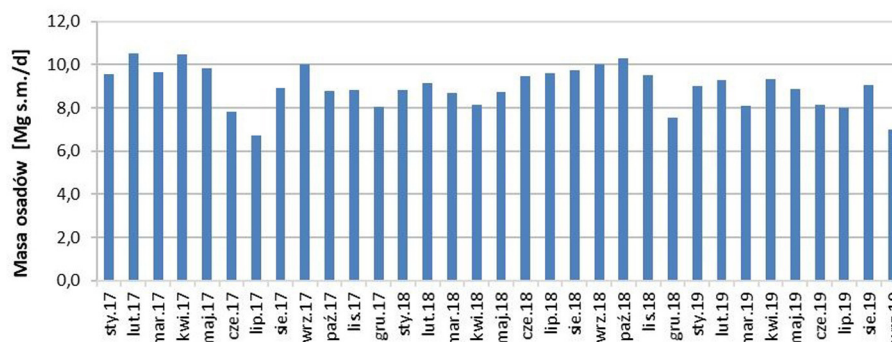
wytwarzanego biogazu w odniesieniu do objętości ścieków i dopływającego do oczyszczalni ładunku zanieczyszczeń, jak również określono podstawowe jednostkowe wskaźniki produkcji osadu, biogazu i energii elektrycznej. Określono energochłonność obiektu oraz przeprowadzono bilans energii w systemie biogazowo-energetycznym oczyszczalni ścieków.

## WYNIKI BADAŃ

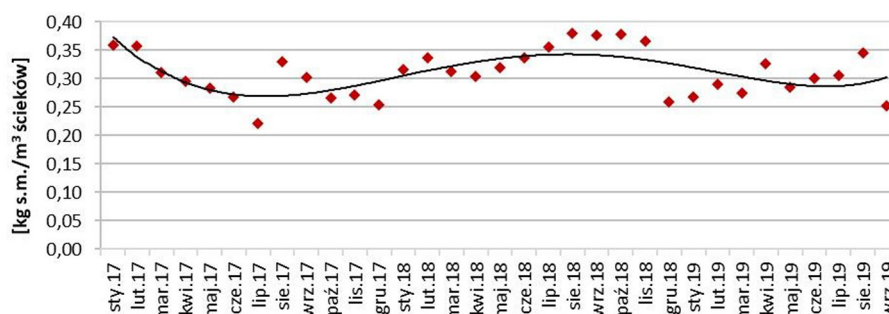
### Ilość osadów ściekowych

Masę osadów ściekowych generowanych w procesach oczyszczania ścieków determinuje skład i ilość ścieków dopływających do oczyszczalni. W analizowanym okresie od 1 stycznia 2017 roku do 30 września 2019 r. przepływ dobowy  $Q_{dsr}$  w oczyszczalni ścieków kształtował się na poziomie od 20 895 do 78 865 m<sup>3</sup>/d, przy średniej wartości na poziomie 29 163,0 ± 2 757,1 m<sup>3</sup>/d, stanowiąc 64,8% obciążenia nominalnego. Z kolei analiza obciążenia substratowego obiektu wskazuje, że ładunki zanieczyszczeń organicznych wyrażonych BZT<sub>5</sub> w dopływie do oczyszczalni oscylowały w przedziale od 4 629 do 25 897 kg O<sub>2</sub>/d. W związku z powyższym średnia dobowo masa powstających osadów zmieszanych (wstępnych i nadmiernych) wyniosła 8,96 ± 0,94 Mg s.m./d (rys. 1). Nie odnotowano sezonowości produkcji osadów ściekowych, zarówno wstępnego, jak i nadmiernego. W ujęciu miesięcznym największą ilość osadów powstało w październiku 2018 r. (318,7 Mg s.m.), a najmniej w lipcu 2017 r. (208,5 Mg s.m.). Średnia miesięczna produkcja osadów zmieszanych wyniosła z kolei 272,1 Mg s.m./m-c.

Analiza ilości wytwarzanych osadów ściekowych umożliwia oszacować wskaźnik produkcji osadów. Jednostkowa sucha masa osadów ściekowych (zmieszanych) w odniesieniu do strumienia oczyszczanych ścieków była dosyć zmienna i kształtowała się na poziomie 0,221 ÷ 0,379 kg s.m./m<sup>3</sup>, przy średniej wartości równej 0,309 ± 0,041 kg s.m./m<sup>3</sup> (rys. 2). Natomiast jednostkowa sucha masa osadu w przeliczeniu na ładunek zanieczyszczeń osiągnęła wartość 42,8 ± 7,4 g s.m./(RLM·d), przy zakresie 31,0 ÷ 57,1 g s.m./(RLM·d). Średnia ilość osadów ściekowych powstających w opolskiej oczyszczalni jest minimalnie wyższa w odniesieniu do danych literaturowych. Dla porównania badania Instytutu Ochrony Środowiska w Warszawie wskazują na jednostkową produkcję osadów ściekowych na poziomie 0,251 kg s.m./m<sup>3</sup>



Rys. 1. Masa wytworzonych osadów ściekowych (wstępny+nadmierny) w analizowanym okresie.  
Fig. 1. Mass of sewage sludge (primary sludge + excess sludge) in the analyzed period



Rys. 2. Jednostkowa sucha masa osadu w przeliczeniu na 1 m³ oczyszczonych ścieków  
Fig. 2. The unit dry mass of sewage sludge per 1 m³ of treated wastewater

ścieków [Heidrich 2005], a dane ankietowe z 16 województw podają wartość średnią krajową równą 0,247 kg s.m./m<sup>3</sup> [Janosz-Rajczyk 2004]. Z kolei jednostkowa sucha masa osadów powstająca np. w oczyszczalni ścieków w Rzeszowie (osady odwodnione) wynosiła od 0,177 do 0,365 kg s.m./m<sup>3</sup>, średnio 0,248 kg s.m./m<sup>3</sup> [Masłoń i Tendera 2017].

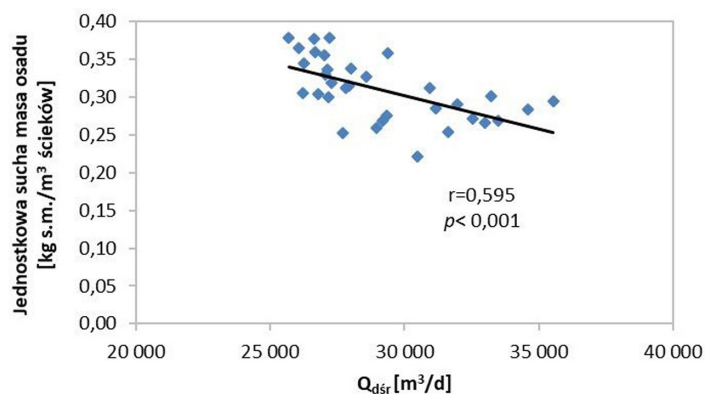
Nie stwierdzono sezonowości i cykliczności produkcji osadów ściekowych, nie mniej jednak analiza statystyczna produkcji osadów ściekowych wykazała istotne zależności pomiędzy jednostkową suchą masą osadu a ilością oczyszczanych ścieków (rys. 3) oraz ładunkiem zanieczyszczeń (rys. 4).

### Gospodarka biogazowo-energetyczna

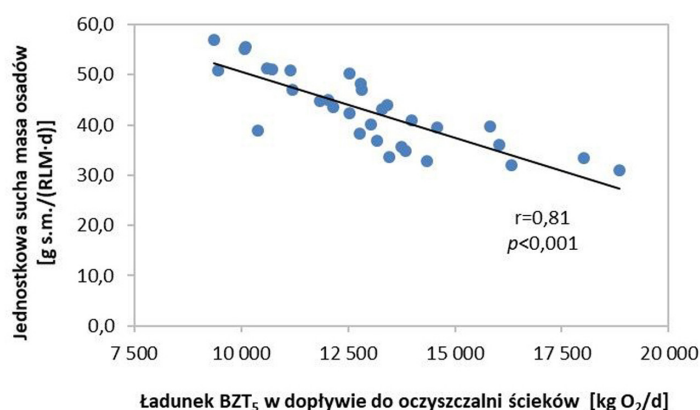
Miesięczna produkcja biogazu w wydzielonych komorach fermentacji wynosiła od 75 687 do 152 585 Nm<sup>3</sup> (średnia wartość na poziomie 114 018 Nm<sup>3</sup>/m-c). W miesiącach jesiennych, z wyjątkiem 2019 r., wytwarzana była większa ilość biogazu, aniżeli w pozostałym okresie roku. Nie mniej jednak nie odnotowano trendu sezonowego w produkcji biogazu, co przedstawiono na rysunku 5.

Dobowa ilość wytwarzanego biogazu oscylowała w zakresie 2 522,9÷5 086,2 Nm<sup>3</sup>/d osiągając średnią wartość 3 751,4 Nm<sup>3</sup>/d. Dla porównania średnia dobowa produkcja biogazu w innych, podobnych pod względem technologicznym, oczyszczalniach ścieków była następująca: 4 383,5 Nm<sup>3</sup>/d w Splicie na Chorwacji (Q<sub>dsr</sub>=34 650 m<sup>3</sup>/d i 275 tys. RLM) [Đurđević i in. 2019], 3 205,5 Nm<sup>3</sup>/d w Rijecie na Chorwacji (Q<sub>dsr</sub>=27 814 m<sup>3</sup>/d i 200 tys. RLM) [Đurđević i in. 2019], 3 833,7 Nm<sup>3</sup>/d w Krośnie (Q<sub>dsr</sub>=35 400 m<sup>3</sup>/d i 117 tys. RLM) [Trojanowicz i Karamus 2016], 4 301,9 Nm<sup>3</sup>/d w Rzeszowie (Q<sub>dsr</sub>= 54 500 m<sup>3</sup>/d i 398 tys. RLM) [Masłoń i Tendera, 2017].

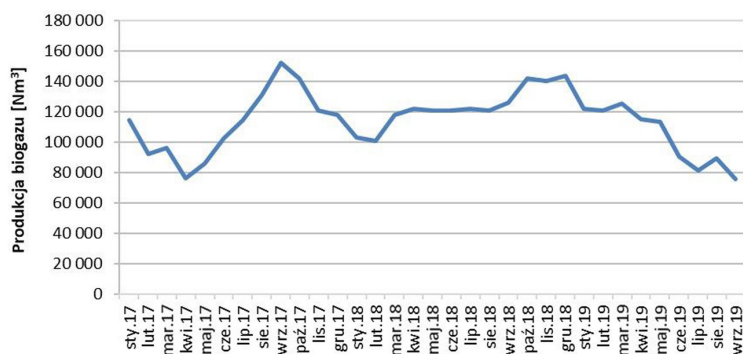
Z 1 kg suchej masy zmieszanych osadów wprowadzanych do wydzielonych komór fermentacji w rozpatrywanym okresie uzyskiwano od 0,242 do 0,615 Nm<sup>3</sup> biogazu, a średni jednostkowy uzysk biogazu wyniósł 0,422 Nm<sup>3</sup>/kg s.m. (rys. 6). Dla porównania w rzeszowskiej oczyszczalni ścieków osiągnięto uzysk biogazu w przedziale od 0,252 do 0,519 Nm<sup>3</sup>/kg s.m. osadu, przy czym w układzie technologicznym fermentację wspomagano dodatkiem tłuszczów odpadowych (proces kofermentacji) [Masłoń i Tendera 2017].



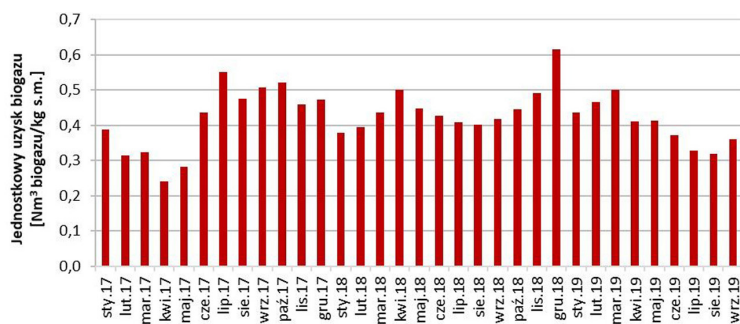
Rys. 3. Wpływ ilości oczyszczanych ścieków na jednostkową suchą masę osadu  
 Fig. 3. Impact of the amount of treated wastewater on the unit dry mass of sewage sludge



Rys. 4. Wpływ ładunku BZT<sub>5</sub> w dopływie do oczyszczalni na jednostkową suchą masę osadu.  
 Fig. 4. Impact of BOD<sub>5</sub>-load in wastewater inflow on the unit dry mass of sewage sludge



Rys. 5. Produkcja biogazu  
 Fig. 5. Volume of biogas production

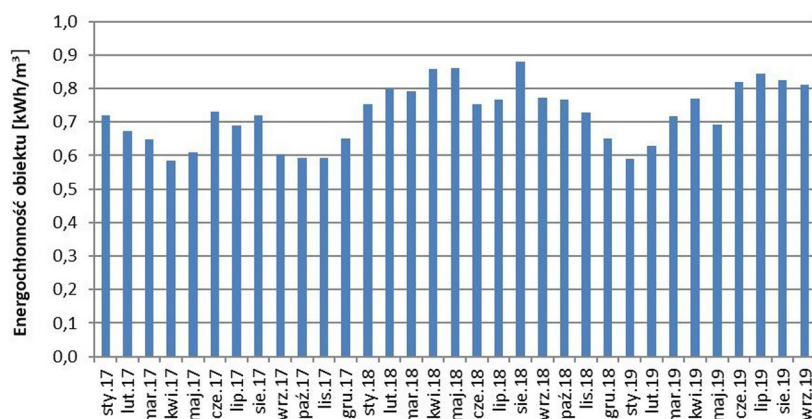


Rys. 6. Jednostkowy uzysk biogazu  
 Fig. 6. Unit biogas yield

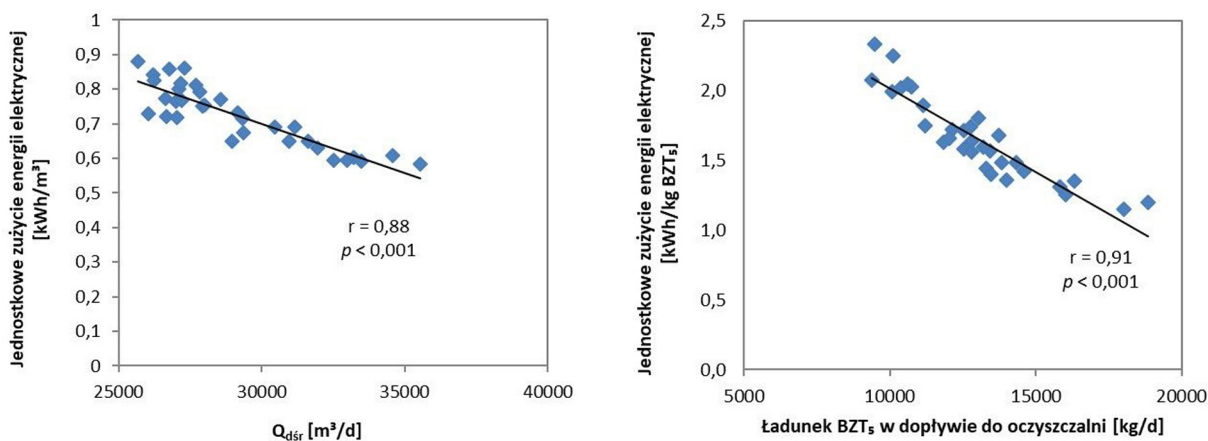
Analiza efektywności procesu fermentacji metanowej w oczyszczalni ścieków polega na określeniu rocznej produkcji biogazu w odniesieniu do równoważnej liczby mieszkańców. W analizowanym trzyleciu osiągnięto produkcję biogazu na poziomie  $6,53 \text{ Nm}^3/(\text{RLM} \cdot \text{rok})$ ,  $6,46 \text{ Nm}^3/(\text{RLM} \cdot \text{rok})$  i  $6,9 \text{ Nm}^3/(\text{RLM} \cdot \text{rok})$  odpowiednio w 2017, 2018 i 2019 roku. Wg kryterium oceny efektywności fermentacji stwierdza się bardzo dobrą stabilizację osadu i efektywną fermentację na poziomie W3, tj. w przedziale od 5,9 do  $8,2 \text{ Nm}^3/(\text{RLM} \cdot \text{rok})$ . Maksymalny potencjał fermentacji ww. kryterium został oszacowany na poziomie  $9,6 \text{ Nm}^3/(\text{RLM} \cdot \text{rok})$  [Wójtowicz 2013].

Ocena pracy układu biogazowo-energetycznego oczyszczalni ścieków powiązana jest zazwyczaj z analizą energochłonności systemu oczyszczalni ścieków, dzięki czemu można rozpatrywać oczyszczalnię ścieków jako kombinat technologiczno-energetyczny. Energochłonność oczyszczalni ścieków w Opolu, oszacowana na podstawie zużycia energii elektrycznej oraz stru-

mienia ścieków i ładunku  $\text{BZT}_5$  usuniętego w procesach technologicznych, wynosiła średnio  $0,723 \text{ kWh/m}^3$  ( $0,583 \pm 0,88 \text{ kWh/m}^3$ ) i  $1,66 \text{ kWh/kg BZT}_5$  ( $1,2 \pm 2,34 \text{ kWh/BZT}_5$ ) (rys. 7). Porównując uzyskane wyniki z danymi literatury można uznać energochłonność opolskiej oczyszczalni za umiarkowaną. Przy czym należy wspomnieć, że obiekt jest obecnie poddawany modernizacji, także w zakresie obniżenia zużycia energii elektrycznej, co skutkować będzie w przyszłości niższą energochłonnością. Energochłonność instalacji wynika z wielu składowych – technologii oczyszczania ścieków i przeróbki osadów ściekowych, rodzaju i ilości ścieków. Raport Izby Gospodarczej „Wodociągi Polskie” określił średni wskaźnik energochłonności dla polskich oczyszczalni na poziomie  $0,77 \text{ kWh/m}^3$  [Benchmarking 2016], natomiast Wróblewski i Heidrich [2017] oszacowali jednostkowe zużycie energii elektrycznej w oczyszczalniach ścieków komunalnych w Polsce na poziomie od  $0,45$  do  $1,29 \text{ kWh/m}^3$ , przy średniej wartości równej  $0,84 \text{ kWh/m}^3$ .



Rys. 7. Energochłonność oczyszczalni ścieków w analizowanym okresie  
Fig. 7. Energy consumption of wastewater treatment plants in the analyzed period



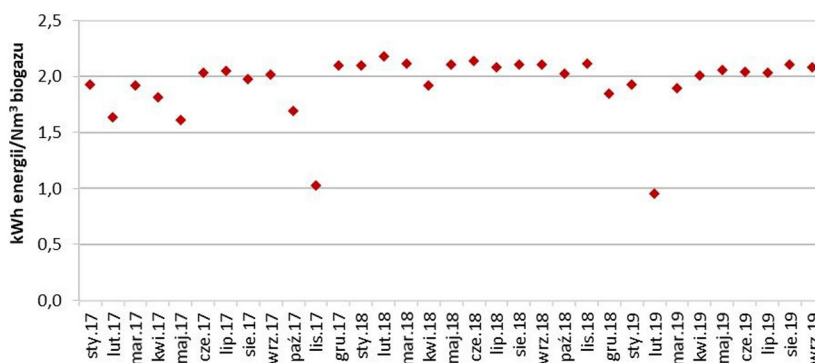
Rys. 8. Wpływ obciążenia hydraulicznego i substratowego na zużycie energii elektrycznej w oczyszczalni ścieków  
Fig. 8. Impact of hydraulic and substrate load on electricity consumption at the wastewater treatment plant

Implementacja danych wykazała statystyczne zależności pomiędzy zużyciem energii elektrycznej w oczyszczalni ścieków, a ilością dopływających ścieków i ładunkiem zanieczyszczeń w dopływie do obiektu (rys. 8).

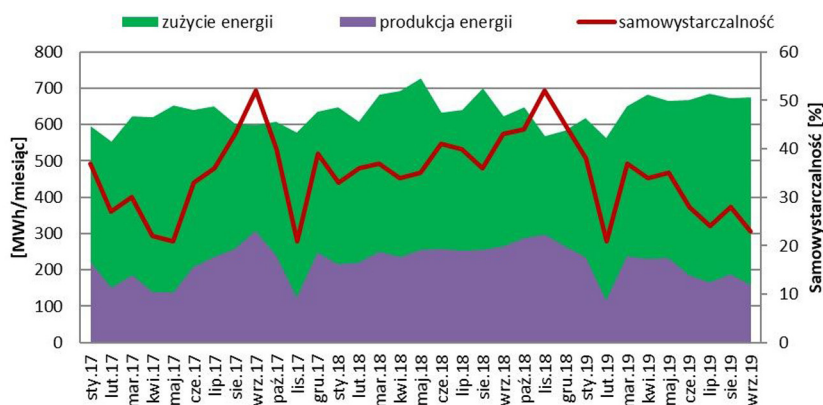
Ilość generowanego biogazu w oczyszczalni ścieków w Opolu przełożyła się w dużym stopniu na produkcję energii elektrycznej. Od stycznia 2017 roku do września 2019 roku w oczyszczalni w dwóch agregatach prądotwórczych wyprodukowano łącznie 7,26 GWh energii elektrycznej. Miesięczna produkcja energii elektrycznej była jednak bardzo zróżnicowana, od 115,65 MWh (luty 2019 r.) do 308,39 MWh (wrzesień 2017 r.), co także wpłynęło na pracę układu agregatorów. Zawartość metanu w biogazie pozyskiwanym w procesach fermentacji wynosiła średnio 62,8%, efektem czego określona jednostkowa produkcja energii elektrycznej wynosiła od 0,95 do 2,18 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu (średnio 1,93±0,28 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu) i od 0,438 do 1,134 kWh/kg s.m. osadu (średnio 0,815±0,19 kWh/kg s.m. osadu) (rys. 9). Z kolei oszacowany tzw. odzysk energii elektrycznej ze ścieków

oscylował w przedziale od 0,127 do 0,379 kWh/m<sup>3</sup> ścieków oczyszczonych. Skuteczność produkcji energii z biogazu w oczyszczalni ścieków w Opolu można uznać za porównywalną z innymi obiektami. W innych oczyszczalniach ścieków osiągnięto wskaźniki produkcji energii elektrycznej z biogazu na poziomie 1,16÷2,21 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu (Zamość) [Masłoń 2020], 1,9÷4,8 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu (Mielec) [Masłoń i in. 2015], 3,82÷4,51 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu (Krosno) [Trojanowicz i Karamus 2016] i 2,02÷2,48 kWh/Nm<sup>3</sup> biogazu (Rzeszów) [Masłoń 2017].

W analizowanym okresie praca agregatów prądotwórczych pozwoliła pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną na poziomie od 21 do 52%. Średni stopień samowystarczalności obiektu (produkcja własna energii) wyniósł 34,7% (rys. 10). Nie mniej jednak w wyniku wprowadzenia intensyfikacji procesu fermentacji osadów ściekowych poprzez dodatek substratu organicznego (np. tłuszczu odpadowego) możliwe staje się zwiększenie uzysku biogazu i w konsekwencji polepszenie efektywności energetycznej całej oczyszczalni ścieków.



Rys. 9. Jednostkowa produkcja energii elektrycznej z biogazu  
Rys. 9. Unit electricity production from biogas



Rys. 10. Bilans energetyczny w oczyszczalni ścieków w Opolu  
Fig. 10. Energy balance at wastewater treatment plants in Opole



## PODSUMOWANIE

Analiza gospodarki osadowej oraz systemu biogazowo-energetycznego w oczyszczalni ścieków w Opolu wskazuje, że pozyskiwany biogaz jako produkt uboczny podczas fermentacji osadów ściekowych stanowi cenne paliwo, które może być efektywnie wykorzystane do zasilania agregatów prądotwórczych. Dlatego też wykorzystanie biogazu poprawia bilans energetyczny całej oczyszczalni ścieków. Z 1 kg suchej masy wytworzonych osadów ściekowych wprowadzanych do wydzielonych komór fermentacji uzyskano średnio 0,422 Nm<sup>3</sup>/kg s.m, efektem czego roczna produkcja biogazu w latach 2017–2019 wynosiła średnio 1,4 mln Nm<sup>3</sup> biogazu. Ocena efektywności fermentacji, mimo krótkiego czasu zatrzymania w komorach WKF (13–15 dni), wskazuje na bardzo dobrą stabilizację osadu i efektywną fermentację, przy czym udział metanu w biogazie wynosił średnio 62,8%. Układ biogazowo-energetyczny w rozpatrywanym okresie funkcjonował prawidłowo. W dwóch agregatach prądotwórczych wyprodukowano z biogazu łącznie 7,26 GWh energii elektrycznej, co pozwoliło na blisko 35% pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną. Aktualnie obiekt jest poddawany kompleksowej modernizacji technicznej i technologicznej, także w zakresie obniżenia zużycia energii elektrycznej i efektywnego wykorzystania biogazu w celach energetycznych.

## LITERATURA

- Benchmarking. 2016. Wyniki Przedsiębiorstw Wodociągowo-Kanalizacyjnych w Polsce. Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”. 2016.
- Bodík I., Kubaská M. 2013. Energy and sustainability of operation of a wastewater treatment plant. *Environment Protection Engineering*, 39(2), 15-24.
- Đurđević, D., Blecich, P., Jurić, Ž. 2019. Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies*, 12, 1927.
- ETV4WATER Raport. 2017. Analiza ścieżek odzysku energii i poprawy efektywności w komunalnych oczyszczalniach ścieków, (Eds) Szatkowska B., Paulsrud B., Neczej E., Oslo.
- Grübel K., Machnicka A. 2020. Wykorzystanie dezintegracji hybrydowej do poprawy stabilizacji beztlenowej osadu ściekowego. *Inżynieria Ekologiczna*, 21(1), 1-8.
- Heidrich E. S., Curtis T. P., Dolfig J. 2011. Determination of the internal chemical energy of wastewater *Environmental Science & Technology*, 45, 827-832.
- Heidrich Z. 2005. Ilość osadów ściekowych. *Przegląd komunalny*, 12, 35-37.
- Henriques J., Catarino J. 2017. Sustainable value - An energy efficiency indicator in wastewater treatment plants. *Journal of Cleaner Production*, 142, 323-330.
- Iżewska A., Szaflik W. 2016. Przetwarzanie energetyczne osadów w wydzielonej komorze fermentacyjnej oczyszczalni ścieków Pomorzany w Szczecinie. *Inżynieria Ekologiczna*, 48, 88-95.
- Janosz-Rajczyk M. 2004. Komunalne osady ściekowe - podział, kierunki zastosowań oraz technologie przetwarzania, odzysku i unieszkodliwiania. Politechnika Częstochowska. Instytut Inżynierii Środowiska. Częstochowa, ss. 115.
- Kołodziejak G. 2012. Możliwości wykorzystania potencjału energetycznego biogazu powstającego w trakcie procesu oczyszczania ścieków. Analiza opłacalności proponowanych rozwiązań. *Nafta-Gaz*, 68(12), 1036-1043.
- Krupa K. 2015. Zrównoważona energetyka biogazowa w oczyszczalniach ścieków. *Polityka Energetyczna*, 4, 101-112.
- Masłoń A. 2017. Analysis of energy consumption at the Rzeszów Wastewater Treatment Plant. *E3S Web of Conferences*, Vol. 22, 00115.
- Masłoń A. 2020. An Analysis of Sewage Sludge and Biogas Production at the Zamość WWTP. In: Blikharsky Z., Koszelnik P., Mesáros P. (eds) *Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 47, 291-298. Springer, Cham.
- Masłoń A., Pazdro S., Mroczek W. 2015. Gospodarka osadowa w oczyszczalni ścieków w Mielcu. *Forum Eksploatatora*, 4(79), 47-54.
- Masłoń A., Tendera K. 2017. Gospodarka osadami ściekowymi w oczyszczalni ścieków Rzeszów. *Forum Eksploatatora*, 1(88), 38-45.
- Orchowski M., Masłoń A., Heidrich Z. 2018. Energochłonność oczyszczalni ścieków w Sandomierzu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2, 68-73.
- Trojanowicz K., Karamus Ł. 2016. Energetyczna utylizacja biogazu jako element gospodarki osadowej w oczyszczalni w Krośnie. *Forum Eksploatatora* 4(85), 46-53.
- Wójtowicz A. 2013. Potencjał energetyczny gospodarki komunalnej ze szczególnym uwzględnieniem gospodarki ściekowej. VIII Forum Energetyczne, Sopot.
- Wróblewski J., Heidrich Z. 2017. Energochłonność miejskich oczyszczalni ścieków. Cz. II. Badania własne, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 9, 363-365.