

PRZETWARZANIE ENERGETYCZNE OSADÓW W WYDZIELONEJ KOMORZE FERMENTACYJNEJ OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW POMORZANY W SZCZECINIE

Anna Iżewska¹, Władysław Szaflik¹

¹ Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, e-mail: anna.izewska@zut.edu.pl, wladyslaw.szaflik@zut.edu.pl

STRESZCZENIE

Oczyszczalnia Ścieków Pomorzany w Szczecinie zapewnia uzyskanie wymaganych parametrów ścieków oczyszczonych. Jednak dzięki wysokiej efektywności oczyszczania ścieków, powstaje więcej odpadów (skratki, odpady) po procesie oczyszczania. W badanej oczyszczalni osad wstępny zagęszczany jest grawitacyjnie do zawartości około 5% suchej masy, a nadmierny zagęszczany jest w zagęszczarkach mechanicznych do 6% suchej masy. Osady wstępny i nadmierny po zagęszczeniu odprowadzany jest do zbiornika osadu zagęszczonego skąd za pomocą pomp wtłaczany jest do dwóch zamkniętych komór fermentacyjnych. Każda z komór fermentacyjnych ma pojemność 5069 m³. W komorach prowadzona jest fermentacja mezofilowa w temperaturze ok. 37 °C. Produkowany w komorze biogaz jest magazynowany w dwóch dwupowłokowych zbiornikach o pojemności 1500 m³ każdy i po odsiarczeniu metodą biosulfex (w wyniku procesu uzyskuje się elementarną siarkę) wykorzystywany jest jako paliwo w agregatach kogeneracyjnych. Celem badań było określenie ilości energii oddawanej w postaci ciepła w trakcie procesu fermentacji metanowej przez osady ściekowe (wstępny i nadmierny). Ilości te określono na podstawie bilansu energii chemicznej osadów doprowadzanych i odprowadzanych z WKF oraz wytwarzanego biogazu w ciągu doby. W badaniach określono, że procentowa wartość średniej ilości energii chemicznej zamienionej na ciepło i odprowadzonej z wyprodukowanym z nich metanem w stosunku do energii chemicznej ścieków doprowadzonych do pierwszej WKF dla Oczyszczalni Ścieków Pomorzany w Szczecinie, dla poziomu ufności 0,95, mieściła się w przedziale $47,86 \pm 9,73\%$. Średnio z metanem wydzielane jest $80,86 \pm 33,65\%$ a na ciepło zamienia się $19,14 \pm 33,65\%$ energii.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, wartość opałowa, bilans energii chemicznej Wydzielonej Komory Fermentacji

ENERGY SLUDGE PROCESSING IN A SEPARATE WASTEWATER TREATMENT PLANT DIGESTER POMORZANY IN SZCZECIN

ABSTRACT

Pomorzany Sewage Treatment Plant in Szczecin ensures the required parameters of treated sewage. However, due to higher efficiency of sewage treatment, more sludge is produced after the treatment process. In the examined sludge treatment plant, primary sludge is gravitationally thickened to the content of about 5% of dry matter, and the excessive is thickened in mechanical compactors up to 6% of dry matter. Settlements preliminary and excessive after compaction is discharged to the sludge tank where a pump is forced into two closed digesters. Each digester has the capacity of 5069 m³. At a temperature of about 37 °C a mesophilic digestion is performed. Biogas, that is produced in the chamber, is stored in two-coat tanks with the capacity of 1500 m³ each and after desulphurization with the biosulfex method (which results with obtaining elemental sulphur) it is used as fuel in cogeneration units. The aim of this study was to determine amount of energy given by sewage sludge in the form of heat during the process of methane digestion (primary and excessive). These amounts were determined on the basis of chemical energy balance of sewage carried into and out of Separate Sludge Digesters and produced biogas within 24h. The study determined that the percentage value of average chemical energy amount turned into heat and discharged with produced methane in relation to chemical energy of sewage carried into the first digester in Pomorzany Treatment Plant in Szczecin was in the range of $47.86 \pm 9.73\%$ for a confidence level of 0.95. On average $80.86 \pm 33.65\%$ was emitted with methane and $19.14 \pm 33.65\%$ of energy was changed into heat.

Keywords: sewage sludge, calorific value, chemical energy balance in Separate Sludge Digester

WPROWADZENIE

Osady ściekowe są końcowym produktem oczyszczania ścieków. W krajach wysoko uprzemysłowionych proces zagospodarowania i unieszkodliwiania osadów ściekowych, jest problemem technicznym, ekonomicznym i ekologicznym. Zgodnie z ustawą o odpadach z 14 grudnia 2012 r. [Dz.U. 2013, 21 z późn. zm.] osady ściekowe są uznane za odpady, ponieważ zawierają duży ładunek substancji organicznej, zanieczyszczeń chemicznych, w tym metali ciężkich, pestycydów, leków i innych niebezpiecznych związków organicznych. Stanowią one również zagrożenie sanitarne ze względu na obecność jaj pasożytów jelitowych oraz mikroorganizmów chorobotwórczych [Białobrzewski i in. 2015, Bień 2002, Iacovidou i in. 2012, Mata-Alvarez i in. 2014].

W roku 2013 w Polsce wytworzono 540,3 tys. Mg s.m. komunalnych osadów ściekowych [Ochrona Środowiska 2014], z czego około 41% było unieszkodliwianych poprzez składowanie oraz gromadzenie na terenie oczyszczalni (na składowiskach, lagunach i w stawach osadowych). Kolejnymi kierunkami zagospodarowania było między innymi: zastosowanie w rolnictwie (20%) oraz przekształcanie termicznie (14%). Do podstawowych procesów technologicznych unieszkodliwiania osadów ściekowych jakie obecnie się stosuje w Polskich oczyszczalniach ścieków można zaliczyć: kompostowanie, suszenie, spalanie, pirolizę czy fermentację metanową [Białobrzewski i in. 2015, Bień i in. 2011, Bień 2012].

Zgodnie z załącznikiem nr 4 do rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach [Dz.U. 2015, 1277] osady ściekowe nieustabilizowane od pierwszego stycznia 2016 roku nie mogą być składowane. W związku z tym jedną z najlepszych metod utylizacji komunalnych osadów ściekowych jest ich zagospodarowanie metodami termicznymi [Bień, Bień 2015].

Celem badań było określenie ilości energii oddawanej w postaci ciepła w trakcie procesu fermentacji metanowej przez osady ściekowe (wstępny i nadmierny). Ilości te określono na podstawie bilansu energii chemicznej osadów doprowadzanych i odprowadzanych z WKF oraz wytwarzanego biogazu w ciągu doby. Różnica pomiędzy wartościami ciepła spalania substratów i produktów stanowi energię wydzieloną w po-

staci ciepła w trakcie przemian biochemicznych zachodzących w WKF. W pracy Szaflik i in. [Szaflik i in. 2014] określono procentowy strumienia energii chemicznej osadów wydzielonej w postaci ciepła i metanu w WKF.

Ze względu na doprowadzanie do Wydzielonej Komory Fermentacyjnej w poszczególnych dobach osadu ściekowego w różnej ilości i o innym składzie oraz wpływ czasu na przebieg fermentacji osadów ściekowych, bilans energii sporządzono dla uśrednionych pomierzonych wartości ciepła spalania osadu doprowadzanego i odprowadzanego z komory WKF z dziesięciu wybranych dób w ciągu sześciu miesięcy w 2014 roku.

GOSPODARKA OSADAMI W OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW POMORZANY W SZCZECINIE

Oczyszczalnia Ścieków Pomorzany w Szczecinie zapewnia uzyskanie wymaganych parametrów ścieków oczyszczonych. Jednak im jest większa efektywność oczyszczania ścieków, tym więcej zanieczyszczeń pozostaje po procesie oczyszczania.

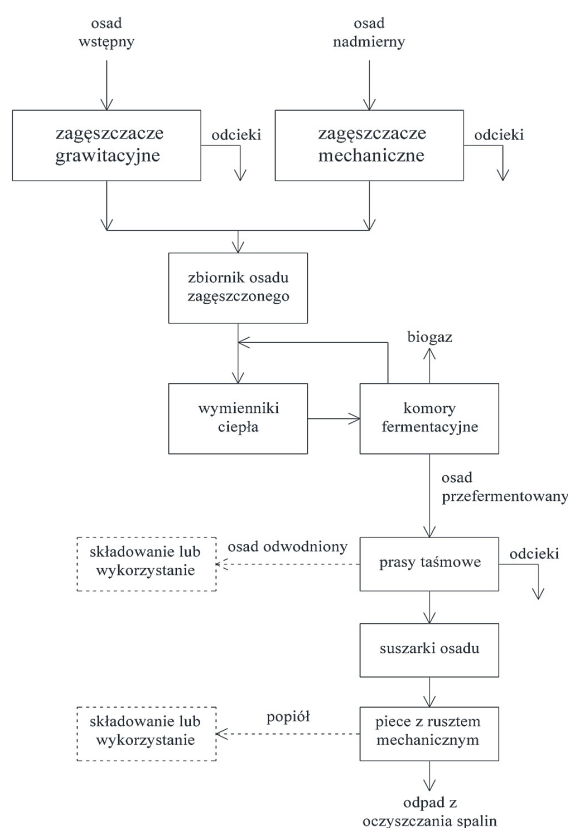
Odpady usuwane na początku procesu oczyszczania mechanicznego tj. skratki – pozostałość po cedzeniu na kratkach oraz piasek – zawiesina mineralna usuwana w piaskownikach są poddawane jedynie płukaniu aby zmniejszyć zawartość części organicznych, a następnie zmniejszana jest w nich zawartość wody poprzez prasowanie w przypadku skratek bądź separację na przenośniku śrubowym w przypadku piasku [Dokumentacja powykonawcza Oczyszczalni Ścieków Pomorzany]. Tak przygotowane odpady – skratki i piasek, wywożone są na wyznaczone miejsce składowania. Ilość wytwarzanych skratek i piasku – ok. 30 ton na miesiąc. Ilość odbieranego osadu wstępnego i wtórnego o zawartości w nim mniej więcej 99% wody wynosi około 2000 m³/d.

Głównym zadaniem przeróbki osadów jest zminimalizowanie ilości i objętości poprzez odprowadzenie części wody oraz unieszkodliwienie osadów – tak aby nie stanowiły zagrożenia dla środowiska naturalnego. Pierwsza faza postępowania z osadem polega na odprowadzeniu części wody w procesie zagęszczania. Z uwagi na różne właściwości osadów wstępnego i nadmiernego zagęszczanie jest prowadzone odmiennie.

Osad wstępny okresowo odbierany jest z le-
jów osadowych osadników wstępnych a następ-
nie zagęszczany jest grawitacyjnie. Osad pom-
powo podawany jest do dwóch zagęszczaczy
grawitacyjnych wyposażonych w mieszałki
prętowe. W zagęszczaczach zawieszona pod
wpływem siły ciężkości opada na dno ulega-
jąc zagęszczeniu, woda nadosadowa odbierana
jest z powierzchni zagęszczaczy poprzez koryta
przelewowe i odprowadzana na początek układu
oczyszczania. Zagęszczony osad z dna jest okre-
sowo odbierany i transportowany do zbiornika
osadu zagęszczonego zmieszanego. Do tego
zbiornika doprowadzany jest również zagęsz-
czony osad nadmierny.

Osad nadmierny odbierany jest cyklicznie
z komór osadu czynnego. Struktura biologicz-
na osadu powoduje, że większość wody w nim
zawartej stanowi wodę związaną w komórkach.
Trudniej też odprowadzić z tego osadu wodę tzw.
wolną, niezwiązaną w komórkach. Osad ten za-
gęszczany jest mechanicznie w urządzeniach tzw.
stołach zagęszczających. Przed podaniem osadu
do urządzenia zagęszczającego następuje jego
kondycjonowanie za pomocą polielektrolitów, co
powoduje koagulację kłaczków osadów i ułatwia
odprowadzanie wody wolnej. Osad nadmierny za-
gęszczany jest na 4 urządzeniach z których każde
współpracuje z dwiema stacjami przygotowania
polielektrolitu. Ogólny schemat technologiczny
gospodarki osadami przedstawiono na rysunku 1.

Osad wstępny zagęszczany jest grawitacyjnie
do zawartości około 5% suchej masy, osad nad-
mierny zagęszczany jest w zagęszczarkach me-
chanicznych zawiera około 6% suchej masy. Osady
wstępny i nadmierny po zagęszczeniu odpro-
wadzany jest do zbiornika osadu zagęszczonego
skąd za pomocą pomp włączany jest do dwóch
zamkniętych komór fermentacyjnych. Każda
z komór fermentacyjnych ma pojemność 5069 m³,
co zapewnia ok. 20 dobowy czas przetrzymania
osadu. W komorach prowadzona jest fermenta-
cja mezofilowa w temperaturze ok. 37°C. Osad
mieszany jest przy użyciu mieszadeł dwuśmigło-
wych podwieszonych pod kopułą. Prowadzona
ciągła cyrkulacja osadu przez spiralne wymienni-
ki ciepła zapewnia stabilne utrzymanie zadanej
temperatury. Komory pracują jako przelewowe,
osad odbierany w trybie ciągłym z komór fer-
mentacyjnych trafia do zbiorników retencyjnych
osadu przefermentowanego. Produkowany w ko-
morze biogaz jest magazynowany w dwóch dwu-



Rys. 1. Schemat blokowy technologii gospodarki osadami [Szaflik i in. 2014]

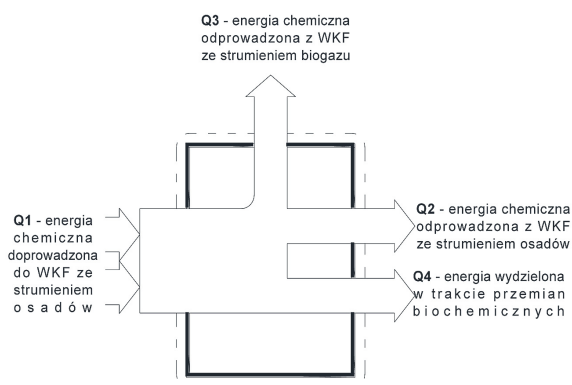
Fig. 1. The block diagram of sludge management technology

powłokowych zbiornikach o pojemności 1500 m³ każdy i po odsiarczeniu metodą biosulfex (w wyniku procesu uzyskuje się elementarną siarkę) wykorzystywany jest jako paliwo w agregatach kogeneracyjnych.

METODYKA POMIARÓW I OBLICZEŃ

Bilans energii chemicznej wydzielonej komory fermentacyjnej

Energię chemiczną osadów przepływających przez komorę fermentacyjną Oczyszczalni Ścieków Pomorzany określono na podstawie bilansu energii osadów świeżego i przefermentowanego, zawartości w nich suchej masy i ich ciepła spalania oraz ilości otrzymywanego biogazu i jego składu chemicznego. Bilans energii określono dla jednej z dwóch komór fermentacyjnych dla okresu doby. Dla sporządzenia bilansu przyjęto schemat dopływu i odpływu energii chemicznej w WKF przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat dopływu i odpływu energii chemicznej w WKF [Szaflik i in. 2014]

Fig. 2. Scheme inlet and outlet of the chemical energy in the digester chamber

Bilans energii [Incropera, De Witt 2001]:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (1)$$

gdzie: Q_1 – energia chemiczna doprowadzana do WKF ze strumieniem osadów [MJ],

Q_2 – energia chemiczna odprowadzana z WKF ze strumieniem osadów [MJ],

Q_3 – energia chemiczna odprowadzana z WKF ze strumieniem biogazu [MJ],

Q_4 – ciepło wydzielane w trakcie przemian biochemicznych osadu [MJ],

Energia Q_1 doprowadzona do WKF ze strumieniem osadów. Wielkość energii chemicznej doprowadzonej do WKF ze strumieniem osadu została wyliczona na podstawie ładunku suchej masy wprowadzanym do komór fermentacyjnych oraz oznaczonego ciepła spalania [Incropera, De Witt 2001].

$$Q_1 = V_{os} \times z_{dsm} \times W_{udsm} \quad [MJ] \quad (2)$$

gdzie: V_{os} – objętość doprowadzonych do WKF osadów w czasie doby [m^3],

z_{dsm} – zawartość suchej masy w osadach doprowadzanych do WKF [kg/m^3],

W_{udsm} – ciepło spalania osadu doprowadzanego do WKF [MJ/kg].

Energia Q_2 odprowadzona z WKF ze strumieniem osadów. Wielkość energii chemicznej odprowadzonej z WKF ze strumieniem osadu została wyliczona podobnie jak doprowadzona do WKF [Incropera, De Witt 2001]:

$$Q_2 = V_{os} \times z_{smo} \times W_{usmo} \quad [MJ] \quad (3)$$

gdzie: V_{os} – objętość odprowadzonych z WKF

osadów w czasie doby [m^3],

z_{smo} – zawartość suchej masy w osadach doprowadzanych do WKF [kg/m^3],

W_{usmo} – ciepło spalania osadu odprowadzanego do WKF [MJ/kg].

Energia Q_3 odprowadzona z WKF ze strumieniem biogazu. Wielkość energii chemicznej odprowadzonej z WKF ze strumieniem osadu została wyliczona podobnie jak doprowadzona do WKF [Incropera, De Witt 2001]:

$$Q_3 = V_{bg} \times W_{bg} \quad [MJ] \quad (4)$$

gdzie: V_{bg} – objętość odprowadzonego z WKF biogazu w czasie doby [m^3].

W_{bg} – ciepło spalania biogazu odprowadzanego z WKF [MJ/m^3].

Ciepło Q_4 wydzielane w trakcie przemian biochemicznych osadu. Ilość ciepła wydzielanego w trakcie przemian biochemicznych osadu określono z odpowiednio przekształconej zależności pierwszej [Incropera, De Witt 2001]:

$$Q_4 = Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad (5)$$

Wydzielone Komory Fermentacyjne (WKF) w Oczyszczalni Ścieków Pomorzany w Szczecinie pracują jako przelewowe, przyjęto, że ilość osadu doprowadzanego odpowiada ilości osadu odprowadzanego mierzony jest strumień osadu doprowadzany do każdej komory. Ponieważ sieć kanalizacji doprowadza do oczyszczalni nie tylko ścieki bytowo-gospodarcze ale i wody deszczowe, zarówno skład jak i ilość osadu doprowadzanego jest zmienna. Komora w tej sytuacji pełni rolę zbiornika wyrównawczego – wyprowadzane są z niej osady o uśrednionym składzie z okresu ich przetrzymywania. W związku z tą rolą Komory, w celu uzyskania miarodajnych wyników wybrano losowo z okresu sześciu miesięcy dziesięć dób, dla których dokonano uśrednienia otrzymanych wyników. Dla sprawdzenia poprawności przeprowadzonego bilansu również określono średnią zawartość części mineralnych w osadzie dopływającym i odpływającym, równe ilości będą świadczyć o poprawności przyjętej metody określenia udziału energii wydzielonej w czasie biochemicznych przemian zachodzących w WKF.

Próbki osadu ściekowego nieprzefermentowanego (na wlocie) do komór fermentacyjnych pobierano za zbiornikiem osadu zmieszanego, do

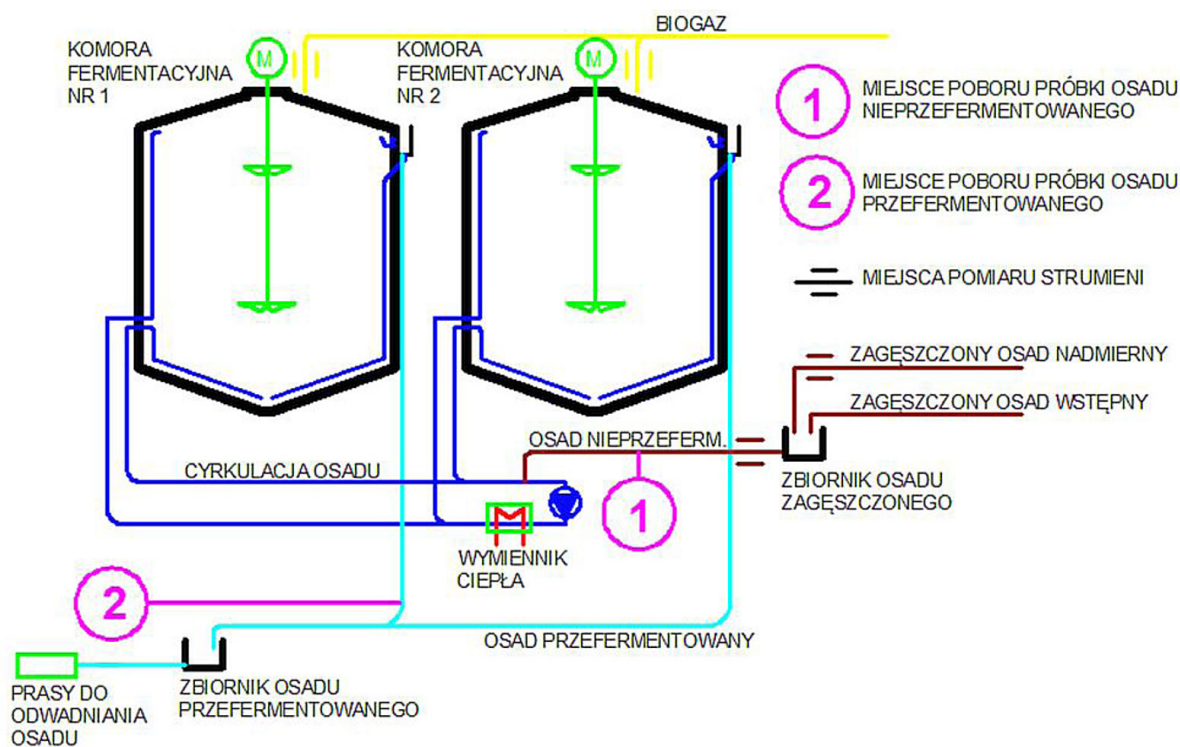
którego doprowadzany jest po zagęszczeniu osad wstępny i nadmierny. Miejscem poboru próbek był króciec na rurociągu przed pompą wtłaczającą osad do instalacji. Próbki osadu przefermentowanego (z wylotu WKF) pobrano ze studni, za komorą, do której dopływa z niej osad. W zbiorniku osadu zagęszczonego (przed fermentacją) osady są mieszane za pomocą mieszadeł zataczalnych szybkoobrotowych, co wpływa na dobre wymieszanie i homogenizację materiału przeznaczonego do badania (rys. 3).

Kolejnym elementem badań były analizy laboratoryjne osadu wprowadzanego i odprowadzanego z komór fermentacyjnych. Zawartość suchej masy oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12880:2004 Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody. Zawartość części organicznych w suchej masie oznaczono zgodnie z normą PN-EN 12879:2004 Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu. Ciepło spalania wraz z wyznaczeniem wartości opałowej (PN-ISO 1928:2002) przeprowadzono w kalorymetrze IKA 2004 o niepewności wyznaczenia wartości opałowej 44 kJ/kg s.m.

WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ

W tabeli 1 zestawiono zawartość suchej masy, zawartość części mineralnych i ciepło spalania dla osadu surowego doprowadzanego i osadu przefermentowanego odprowadzanego z WKF. Średnia zawartość części mineralnych w osadzie doprowadzonym wynosiła 12,01 kg/m³ a w odprowadzonym 11,85 kg/m³, zaś odchylenie standardowe odpowiednio 3,60 i 1,52. Postawiono hipotezę o równości wartości średnich, zweryfikowano ją na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wartość dystrybuanty empirycznej wynosi 0,021, a wartość krytyczna dystrybuanty wynosi 2,262, wartość empiryczna nie znajduje się w obszarze krytycznym – nie ma więc podstaw do odrzucenia założonej hipotezy o równości wartości średnich. Praktycznie równość wartości średniej zawartości części mineralnych świadczy o poprawności przyjętej metody bilansowania energii osadów.

Należy zwrócić uwagę na wartość odchylenia standardowego zawartości substancji mineralnych, jest ona znacznie większa dla osadów doprowadzanych (3,60), niż dla osadów odprowadzanych (1,52) z WKF. Tak samo jest z odchyleniem standardowym zawartości suchej masy w osa-



Rys. 3. Schemat instalacji fermentacji z oznaczeniem miejsc poboru próbek i miejsc pomiarów strumieni osadów i biogazu [Szaflik i in. 2014]

Fig. 3. Installation scheme fermentation with the designation of sampling and measurement of streams of sewage sludge and biogas

Tabela 1. Zestawienie zawartości suchej masy, części mineralnych oraz ciepła spalania osadu doprowadzanego i odprowadzanego z komór fermentacyjnych**Table 1.** Summary of dry matter content, part of the mineral sludge and heat supplied to and discharged from the digesters chamber

| Data | Strumień osadu | Osad surowy | | | Osad przefermentowany | | | Biogaz | |
|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| | | zawartość suchej masy | zawartość części mineralnych | ciepło spalania | zawartość suchej masy | zawartość części mineralnych | ciepło spalania | strumień biogazu | ciepło spalania |
| | m ³ /dobę | kg/m ³ | kg/m ³ | MJ/kg sm | kg/m ³ | kg/m ³ | MJ/kg sm | Nm ³ /dobę | MJ/Nm ³ |
| 22.04.2014 | 260.0 | 41.40 | 10.13 | 16.089 | 30.70 | 11.45 | 13.497 | 2043 | 22.953 |
| 06.05.2014 | 260.0 | 40.80 | 9.91 | 10.968 | 30.40 | 11.64 | 6.504 | 2775 | 22.437 |
| 20.05.2014 | 216.7 | 49.70 | 15.47 | 14.614 | 31.60 | 12.28 | 9.439 | 2173 | 22.636 |
| 03.06.2014 | 239.2 | 46.60 | 11.73 | 14.194 | 32.40 | 12.63 | 12.585 | 2468 | 22.398 |
| 17.06.2014 | 238.4 | 50.10 | 13.92 | 15.783 | 31.60 | 12.18 | 12.634 | 3235 | 22.398 |
| 01.07.2014 | 196.7 | 38.40 | 10.72 | 13.015 | 34.70 | 15.58 | 11.438 | 1775 | 22.794 |
| 15.07.2014 | 180.0 | 61.50 | 19.62 | 16.048 | 29.80 | 11.06 | 13.547 | 3761 | 22.755 |
| 29.07.2014 | 226.7 | 35.20 | 9.27 | 15.087 | 28.30 | 10.81 | 6.912 | 2421 | 22.992 |
| 19.08.2014 | 215.0 | 33.90 | 8.38 | 16.069 | 27.40 | 10.53 | 13.355 | 2193 | 22.477 |
| 02.09.2014 | 203.3 | 43.10 | 10.96 | 15.977 | 27.10 | 10.36 | 11.665 | 1969 | 21.803 |
| Średnia | 223.6 | 44.07 | 12.01 | 14.78 | 30.40 | 11.85 | 11.160 | 2481.30 | 22.564 |
| Odchylenie standardowe | 26.42 | 8.73 | 3.60 | 1.68 | 2.36 | 1.52 | 2.65 | 617.10 | 0.348 |

sm – sucha masa w osadach.

dach. Świadczy to o pracy Wydzielonych Komór Fermentacyjnych jako zbiornika uśredniającego ilość i skład odprowadzanych z niej osadów. Obliczony maksymalny błąd określenia ciepła spalania osadu doprowadzonego do WKF nie przekracza 1.5 %, zaś osadu odprowadzonego 2.0%. W tabeli 2 przedstawiono bilans energii osadów przepływających przez Wydzieloną Komorę Fermentacyjną. Błąd maksymalny wyznaczenia wartości energii chemicznej osadu wykorzystywanego w WKF w poszczególnych dniach zmienia się w zakresie od 4 do 9%.

Procentowa wartość średnia ilości energii zamienioną na ciepło i odprowadzonej z wyprodukowanym z nich metanem względem energii chemicznej ścieków doprowadzonych do WKF dla Oczyszczalni Ścieków Pomorzany w Szczecinie mieści się w przedziale $47,86 \pm 9,95\%$ dla poziomu ufności 0,95. Określono w stosunku do doprowadzonej z osadem energii średnią procentową wartość ilości energii chemicznej zamienioną na ciepło i odprowadzonej z wyprodukowanym z nich metanem. Z tego na ciepło zamienia się średnio 19,14%, a wydziela z metanem 80,86 %, przedział ufności dla poziomu ufności 0,95 wynosi dla każdej z tych wartości $\pm 30,93$ i jest stosunkowo szeroki, wynika on z dużego rozrzutu danych.

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki analizy energetycznej pracy jednej z dwóch Wydzielonych Komór Fermentacyjnych w Oczyszczalni Ścieków Pomorzany. Otrzymany wynik mieści się w zakresie wartości podawanych w literaturze [Cornel i in. 2011]. Analizując zawartość suchej masy badanych osadów ściekowych, która wynosiła od 33,90 do 61,5 kg/m³ dla osadów surowych stwierdzono, że jest ona zbliżona do wartości podawanych przez [Shen and Zhang 2003, Stelmach i Wasielewski 2008]. Średnia zawartość części mineralnych w osadzie doprowadzonym i odprowadzonym mieści się w granicach podawanych w literaturze [Maćkowiak 2000, Ndaji i in 1999, Roca-Perez 2009].

Jednak Shen i Zhang [2003] oraz Stelmach i Wasielewski [2008] stwierdzają, że zawartość popiołu w osadach ściekowych jest większa i wynosi odpowiednio 22,6 i 36,8%. Osady doprowadzone do WKF mają małą wartość ciepła spalania o wartościach zbliżonych do prezentowanych przez Bienia, Stelmacha i Wasielewskiego oraz Werle i Wilka [Bień 2007, Stelmach i Wasielewski 2008, Werle i Wilk 2010]. Małe

Tabela 2. Bilans energii osadów ściekowych przepływających przez WKF
Table 2. Energy balance of sludge flowing through the digester chamber

| Data | Energia chemiczna osadu | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|------------|---------------------------------|---|------------------|---------------------------------|---|--|
| | Doprowa- dzona z osada- mi | Odprowadzona z osadami | | Wydzielona w WKF | | | | | | | | |
| | | | | całkowita | | z biogazem | | | w postaci ciepła | | | |
| | MJ/dobę | MJ/dobę | % energii doprowa- dzanej | MJ/dobę | % energii doprowa- dzanej | MJ/dobę | % energii doprowa- dzanej | % całkowitej energii wydzielonej | MJ/dobę | % energii doprowa- dzanej | % całkowitej energii wydzielonej | |
| 22.04.2014 | 173 182 | 107 733 | 62.21 | 65 449 | 37.79 | 46 892 | 27.08 | 71.65 | 18 557 | 10.72 | 28.35 | |
| 06.05.2014 | 116 349 | 51 408 | 44.18 | 64 941 | 55.82 | 62 264 | 53.51 | 95.88 | 2 677 | 2.30 | 4.12 | |
| 20.05.2014 | 157 393 | 64 636 | 41.07 | 92 757 | 58.93 | 49 187 | 31.25 | 53.03 | 43 570 | 27.68 | 46.97 | |
| 03.06.2014 | 158 217 | 97 535 | 61.65 | 60 682 | 38.35 | 55 277 | 34.94 | 91.09 | 5 404 | 3.42 | 8.91 | |
| 17.06.2014 | 188 510 | 95 177 | 50.49 | 93 333 | 49.51 | 72 457 | 38.44 | 77.63 | 20 876 | 11.07 | 22.37 | |
| 01.07.2014 | 98 306 | 78 070 | 79.42 | 20 236 | 20.58 | 40 460 | 41.16 | 199.94 | -20 224 | -20.57 | -99.94 | |
| 15.07.2014 | 177 651 | 72 666 | 40.90 | 104 985 | 59.10 | 85 580 | 48.17 | 81.52 | 19 405 | 10.92 | 18.48 | |
| 29.07.2014 | 120 392 | 44 345 | 36.83 | 76 047 | 63.17 | 55 664 | 46.24 | 73.20 | 20 383 | 16.93 | 26.80 | |
| 19.08.2014 | 117 119 | 78 674 | 67.17 | 38 445 | 32.83 | 49 292 | 42.09 | 128.22 | -10 847 | -9.26 | -28.22 | |
| 02.09.2014 | 139 994 | 64 267 | 45.91 | 75 727 | 54.09 | 42 930 | 30.67 | 56.69 | 32 797 | 23.43 | 43.31 | |
| Średnia | 144 711 | 75 451 | 52.14 | 69 260 | 47.86 | 56 000 | 38.70 | 80.86 | 13 260 | 9.16 | 19.14 | |
| Odchylenie standardowe | 30 713 | 20 382 | 13.91 | 25 724 | 13.90 | 14 031 | 8.49 | 43.23 | 19 295 | 14.32 | 43.23 | |

ciepło spalania a jednocześnie wartość opałowa badanych osadów ściekowych po fermentacji, które wynosiło od 6,504 do 13,547 MJ/kg suchej masy może wynikać z faktu, że kanalizacja jest ogólnospławna oraz z zawartości azotu, węgla, stosunku węgla do azotu, wodoru i siarki. Wartość opałowa osadów po przefermentowaniu odpowiada osadom średnio przefermentowanym. Procentowa wartość średnia ilości energii chemicznej zamienionej na ciepło i odprowadzonej z wyprodukowanym z nich metanem w stosunku do energii chemicznej ścieków doprowadzonych do pierwszej WKF dla Oczyszczalni Ścieków Pomorzany w Szczecinie, dla poziomu ufności 0,95, mieści się w przedziale $47,86 \pm 9,73\%$. Zaś z tego średnio z metanem wydzielane jest $80,86 \pm 33,65\%$ a na ciepło zamienia się $19,14 \pm 33,65\%$ energii. Przedział ufności jest dosyć szeroki i wyniki ze zmienności strumienia i składu doprowadzanych i odprowadzanych osadów oraz strumienia biogazu. Można by go zmniejszyć poprzez przeprowadzenie długookresowych badań wprowadzanej i odprowadzanej do WKF energii chemicznej substratów i produktów.

Podziękowania

Autorzy artykułu składają podziękowania Zarządowi Zakładu Wodociągów i Kanalizacji w Szczecinie za udostępnienie danych i wyników analiz laboratoryjnych osadów ściekowych z Oczyszczalni Ścieków Pomorzany

LITERATURA

1. Biało-brzewski I., Mikš-Krajnik M., Dach J., Markowski M., Czeakała W., Głuchowska K. 2015. Model of the sewage sludge-straw composting process integrating different heat generation capacities of mesophilic and thermophilic microorganisms. *Waste Management*, 43, 72–83.
2. Bień J. 2007. Osady ściekowe. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.
3. Bień J., Ewa Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M. 2011. Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 14(4), 375–384.
4. Bień J.B. 2002. Osady Ściekowe. Teoria i Praktyka. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa.

5. Bień J.D. 2012. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 15(4), 439–449.
6. Bień J.D., Bień B. 2015. Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi w obliczu zakazu składowania po 1 stycznia 2016. *Inżynieria Ekologiczna*, 45, DOI: 10.12912/23920629/60592.
7. Cornel P., Meda A., Bieker S. 2011. Wastewater as a source of energy, nutrients and service water. *Treatise in Water Science*. Elsevier Verlag.
8. Dane eksploatacyjne Oczyszczalni Ścieków Pomorzany otrzymane z Zakładu Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Szczecinie. Szczecin, 2014.
9. Dokumentacja powykonawcza Oczyszczalni Ścieków Pomorzany. Praca zbiorowa.
10. Iacovidou E., Ohandja D.G., Voulvoulis N. 2012. Food waste co-digestion with sewage sludge – Realising its potential in the UK. *Journal of Environmental Management*, 112, 267–274.
11. Incropera F.P., De Witt D.P. 2001. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, New York.
12. Maćkowiak Cz. 2000. Skład chemiczny osadów ściekowych ich wartość nawozowa. Charakterystyka i zagospodarowanie osadów ściekowych. Bydgoskie Towarzystwo Naukowe. Prace Wydziału Nauk Technicznych, seria A, 30, 16–21.
13. Mata-Alvarez J., Dosta J., Romero-Güiza M.S., Fonoll X., Peces M., Astals S. 2014. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412–427.
14. Ndaji F.E., Ellyatt W.A.T., Malik A.A., Thomas K.M. 1999. Temperature programmed combustion studies of coal and waste materials. *Fuel* 78, 301–307.
15. Ochrona Środowiska 2014. *Roczniki statystyczne GUS*, Warszawa, 2015.
16. Polska Norma. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie strat przy prażeniu suchej masy osadu. PN-EN 12879:2004.
17. Polska Norma. Charakterystyka osadów ściekowych – Oznaczanie suchej pozostałości i zawartości wody. PN-EN 12880:2004.
18. Polska Norma. PN-ISO 1928:2002 Paliwa stałe. Oznaczanie ciepła spalania metody spalania w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej.
19. Roca-Perez L., Martinez C., Marcilla P., Boluda R. 2009. Composting rice straw with sewage sludge and compost effects on the soil-plant system. *Chemosphere*, doi: 10.1016/j.chemosphere.12.059.
20. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczenia odpadów do składowania na składowiskach [Dz.U. 2015, 1277]
21. Shen L., Zhang D. 2003. An experimental study of oil recovery from sewage sludge by low-temperature pyrolysis in a fluidized-bed. *Fuel* 82, 465–472.
22. Stelmach S., Wasielewski R. 2008. Co-combustion of dried sewage and coal in a pulverized coal boiler. *J. Mater Cycles Waste Manag.* 10, 110–115.
23. Szafflik W., Iżewska A., Dominowska M. 2014. Chemical Energy Balance of Digested Sludge in Sewage Treatment Plant Pomorzany in Szczecin. *Annual Set The Environment Protection*, 16(1), 16–33.
24. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, Dz.U. 2013 poz. 21, z późn. zm.
25. Werle S., Wilk R.K. 2010. A review of methods for the thermal utilization of sewage sludge: The Polish perspective. *Renewable Energy* 35, 1914–1919.