

Gospodarka osadami ściekowymi w miejskiej oczyszczalni ścieków

Sewage sludge management at the municipal wastewater treatment plant

DOMINIKA POPROCH, MAŁGORZATA CIMOCHOWICZ-RYBICKA, JUSTYNA GÓRKA, BARTOSZ ŁUSZCZEK

DOI 10.36119/15.2022.10.6

W artykule przedstawiono bilans ilościowy osadów ściekowych oraz bilans energetyczny w miejskiej oczyszczalni ścieków Kraków-Płaszów. W wyniku przeprowadzonych analiz wykazano, że 85% osadów poddawanych jest termicznej utylizacji, a pozostała część jest wywożona poza teren oczyszczalni. Popioły po spalaniu osadów są zagospodarowywane przez specjalistyczne firmy zewnętrzne (głównie budowlane). Głównym kierunkiem zagospodarowania biogazu jest wykorzystanie go do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Dzięki produkowanej energii możliwe jest 100 % pokrycie własnych potrzeb na ciepło i ok 40 % na energię elektryczną. Dla przedmiotowej oczyszczalni ścieków, w roku 2021, średnia wartość wskaźnika określającego ilość zużytej energii elektrycznej, na 1 m³ ścieków oczyszczonych, wyniosła 0,34 kWh/m³.

Słowa kluczowe: oczyszczalnia ścieków, osady ściekowe, biogaz, bilans energetyczny

The article presents the quantitative balance of sewage sludge and the energy balance at the municipal sewage treatment plant Kraków-Płaszów. As a result of the analyzes, it was shown that 85% of the sludge is subjected to thermal treatment, and the remaining part is transported outside the treatment plant. After burning the sludge, the ashes are managed by specialized external companies (mainly construction ones). The main direction of biogas management is its use for the production of heat and electricity. Thanks to the produced own energy, it is possible to cover 100% of the demand for heat and about 40% for electricity. For the Kraków-Płaszów WWTP, in 2021, the average value of the indicator specifying the amount of electricity consumed, per 1 m³ of treated sewage, was 0.34 kWh / m³.

Keywords: wastewater treatment plant, sewage sludge, biogas, energy balance.

Wprowadzenie

Jednym z największych wyzwań współczesnej gospodarki osadowej jest poszukiwanie takich rozwiązań w technologii wody i ścieków, aby z jednej strony dążyć do minimalizacji powstających osadów, z drugiej do skutecznej ich utylizacji. W 2015 roku Komisja Europejska w komunikacie „Zamknięcie obiegu – plan działania Unii Europejskiej dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym” [1] zaleciła wszystkim krajom członkowskim zmianę z modelu gospodarki liniowej na model gospodarki o obiegu zamkniętym. Koncepcja gospodarki o obiegu zamkniętym, znanej również pod nazwą *gospodarka cyrkulacyjna* („circular economy”), oparta jest na założeniu, że wartość produktów, materiałów i zasobów jest utrzymywana tak długo, jak to możliwe, a wytwarzanie odpadów ograniczone do minimum [1,2]. Produkcja powinna opierać się na komponentach krążących

w obiegu gospodarczym, a w szczególności na wykorzystaniu surowców wtórnych. Z kolei odpady powstające w obrębie przedsiębiorstwa powinny być traktowane jak materiał, który można wykorzystać w jego obszarze lub przekazane na potrzeby produkcji innego przedsiębiorstwa. Takimi materiałami są osady ściekowe.

Obecnie istotnym zagadnieniem oczyszczalni ścieków, poza zagwarantowaniem ścieków oczyszczonych o wymaganych parametrach, jest minimalizowanie kosztów eksploatacyjnych, z których znaczną część stanowi energia elektryczna. Istnieje możliwość odzyskania ze ścieków energii, surowców; co może przyczynić się do polepszenia bilansu ekonomicznego przedsiębiorstwa. Ciągły wzrost cen energii zmusza eksploatatorów oczyszczalni ścieków do szukania możliwości wykorzystania potencjału zawartego w ściekach przy równoczesnym zmniejszeniu zakupu energii z zewnątrz. Oczysz-

czalni ścieków, z biologicznym usuwaniem związków biogenych, zaliczane są do obiektów energochłonnych [3].

Produktem fermentacji metanowej jest biogaz składający się głównie z metanu i dwutlenku węgla, a produktem ubocznym jest poferment, który wymaga zagospodarowania. Biogaz może być wykorzystany jako źródło energii. Spalanie biogazu w agregatach kogeneracyjnych umożliwia oczyszczalniom osiągnięcie wysokiego stopnia samowystarczalności energetycznej [4]. Ilość i skład biogazu powstającego w procesie stabilizacji beztlenowej zależy od rodzaju osadu, ilości związków organicznych, temperatury i czasu fermentacji. Biogaz odprowadzony z wydzielonych komór fermentacyjnych poza metanem i dwutlenkiem węgla zawiera siarkowodor i siłoksany. Zanieczyszczenia te muszą zostać usunięte, ponieważ uszkodzają urządzenia kogeneracyjne. Ponadto, każda instalacja gazowa musi być wyposażona w pochodnię

mgr inż. Dominika Poproch <https://orcid.org/0000-0002-0524-6072> – Szkoła Doktorska PK, (dominika.poproch@doktorant.pk.edu.pl),
dr hab. inż. Małgorzata Cimochołowicz-Rybicka, prof. PK, <https://orcid.org/0000-0002-0216-9403>; (mcrybicka@pk.edu.pl)
dr inż. Justyna Górka, <https://orcid.org/0000-0002-9322-6206> – Katedra Technologii Środowiskowych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska; (justyna.gorka@pk.edu.pl)
mgr inż. Bartosz Łuszczek, <https://orcid.org/0000-0002-6466-0978> – Wodociągi Miasta Krakowa S.A. (bartosz.luszczek@wodociagi.krakow.pl)

gazową, w której spalany jest biogaz np. w przypadku wystąpienia awarii. Przebieg procesu fermentacji zależy od rodzaju substratu, temperatury, pH, czasu trwania procesu, obecności substancji toksycznych, obciążenia komory substratem, stężenia składników łatwo przyswajalnych dla mikroorganizmów oraz odpowiednich warunków ich rozwoju [5,6]. Zmiana każdego z parametrów wpływa zarówno na jakość, jak i na ilość gazu fermentacyjnego [7].

Dostosowanie przepisów prawnych do standardów europejskich spowodowało rozwój sieci kanalizacyjnych, a w rezultacie doprowadziło do zwiększenia przepustowości oczyszczalni ścieków. W następstwie tego wzrosła i dalej będzie wzrastać ilość powstających komunalnych osadów ściekowych. Należy przyjąć, że niemal cały ładunek zanieczyszczeń dopływających do oczyszczalni jest przetwarzany na biomasę, a zatem oczyszczanie ścieków to produkcja osadów. W bilansie masy ładunków zanieczyszczeń uwzględnia się przepływy osadów wprowadzanych i wyprowadzanych z urządzeń, które warunkują właściwe założenia projektowe gospodarki osadowej.

Ilość osadów powstających w procesach oczyszczania ścieków szacowana jest poprzez określenie masy osadu w kilogramach suchej masy w ciągu doby lub określenie objętości osadu w m³/d. Dokładniejszym parametrem charakteryzującym ilość osadów jest określenie suchej masy. Podczas prowadzenia procesu stabilizacji osadów następują zmiany w zawartości wody, ponieważ w wyniku procesów hydrolizy i rozkładu ciał stałych dochodzi do obniżenia zawartości suchej masy osadów [8]. Według Rozporządzenia Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów [Dz. U. 2020, poz. 10] [9] ustabilizowane komunalne osady ściekowe klasyfikowane są jako odpad o kodzie 19 08 05. Zgodnie z obowiązującymi przepisami, od 1 stycznia 2016 roku istnieje zakaz składowania osadów o znacznym potencjale energetycznym (powyżej 6 MJ/kg s.m.), a do tej grupy należą osady ściekowe [10]. Przepisy prawne nakładają obowiązek odpowiedniego zagospodarowania tych odpadów. Na wybór sposobu zagospodarowania osadów ściekowych największy wpływ mają: ilość powstających osadów, ich właściwości a także względy ekonomiczne. Najczęściej stosowanymi metodami stabilizacji osadów ściekowych są metody tlenowe i beztlenowe. Osady pochodzące z dużych oczyszczalni ścieków najczęściej stabilizowane są w procesie beztlenowej fermentacji. Celem stabilizacji jest zmniejszenie: objętości osadów, zdolności do zagniwania, uciążliwości zapachowej, zagrożenia występowania organizmów patogennych przy jednoczesnym zachowaniu wartości nawozowych, a tym samym umożliwieniu

ich dalszego zagospodarowania. Ze względów ekonomicznych, najczęściej stosowanym rozwiązaniem jest odzysk biogazu, a następnie jego wykorzystanie do produkcji ciepła i energii elektrycznej na potrzeby własne operatora [11].

Cel i zakres badań

Celem przeprowadzonych badań było sporządzenie bilansów:

- ilościowego, powstających w oczyszczalni osadów;
- energetycznego, uwzględniającego wytwarzany w oczyszczalni biogaz wraz z dodatkowymi źródłami energii odnawialnej. Bilans ilościowy osadów obejmował lata 2016-2020, natomiast bilans energetyczny wykonany został dla lat 2020 – 2021.

Bilanse sporządzane zostały na podstawie badań własnych autorów (zestawienie i opracowanie danych) z wykorzystaniem odczytów z urządzeń pomiarowych zamontowanych w różnych punktach oczyszczalni. Natomiast w następnym rozdziale tego artykułu została przedstawiona charakterystyka miejsc, w których odczytywano wskazania urządzeń będące podstawą do graficznego przedstawienia otrzymanych wyników.

Charakterystyka obiektu badań

Oczyszczalnia ścieków Kraków – Płaszów składa się z części mechanicznej, biologicznej oraz linii przeróbki osadów ściekowych wraz z instalacją biogazu. Zgodnie z pozwoleniem wodnoprawnym średniodobowa ilość ścieków w okresie bezdeszczowym wynosi 165 tys. m³/d. Oczyszczalnia została zaprojektowana na 680 tys. RLM (rys. 1).

Osady wstępne powstają w części mechanicznej oczyszczalni – w osadnikach wstępnych, które charakteryzują się dobrymi własnościami sedymentacyjnymi.

Osady nadmierne, to część osadu czynnego powstające w procesach biologicznego oczyszczania ścieków, w osadnikach wtórnych, które kierowane są do WKF w celu dal-

szej ich przeróbki. Osady te zagęszcza się mechanicznie przy wykorzystaniu wirówek do poziomu średnio 5,9% zawartości suchej masy. Następnie poddaje się wspólnej stabilizacji beztlenowej wraz z osadami wstępnymi o zawartości suchej masy na ok. 7,4%. Ilość osadów doprowadzanych do WKF wynosi średnio 870 m³/d. Proces fermentacji metanowej prowadzony jest w temperaturze 38°C. Mieszanie w komorach odbywa się przy pomocy mieszadeł pionowych wolnoobrotowych, a do podgrzania osadu wykorzystywane są wymienniki ciepła. Powstające osady przefermentowane odwadniają się na wirówkach dekantacyjnych i na prasach taśmowych, gdzie uzyskują zawartość suchej masy na poziomie 23%. A zatem ostatnimi, zaprezentowanymi osadami w bilansie masowym są osady odwodnione, które spalane są w piecu fluidalnym w STUO.

Analiza wyników badań

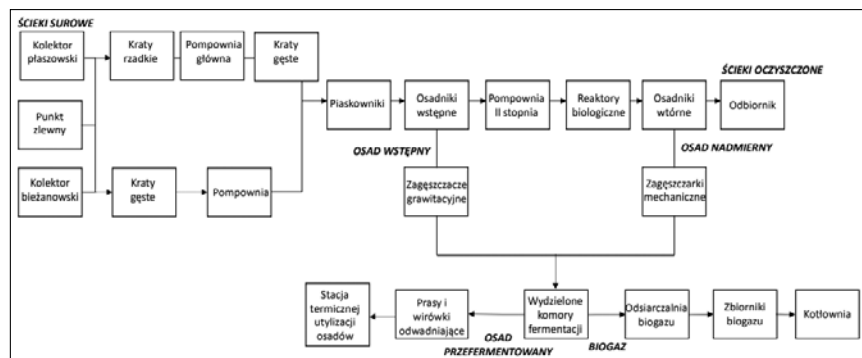
Bilans ilościowy osadów ściekowych w miejskiej oczyszczalni ścieków

Na rysunku 2 przedstawiono bilans ilościowy osadów: wstępnych, nadmiernych, przefermentowanych i odwodnionych powstających w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów.

Obserwując średni bilans ilościowy powstających osadów w latach 2016-2020 (rys. 2) w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów można stwierdzić brak tendencji do zwiększania się ilości osadów. W 2020 roku w bilansie ilościowym osadów zauważono natomiast mniejsze ilości osadów wstępnych, przefermentowanych oraz odwodnionych.

Na rysunku 3 przedstawiono ilości ustabilizowanych, komunalnych osadów ściekowych i sposób ich zagospodarowania w latach 2016-2021.

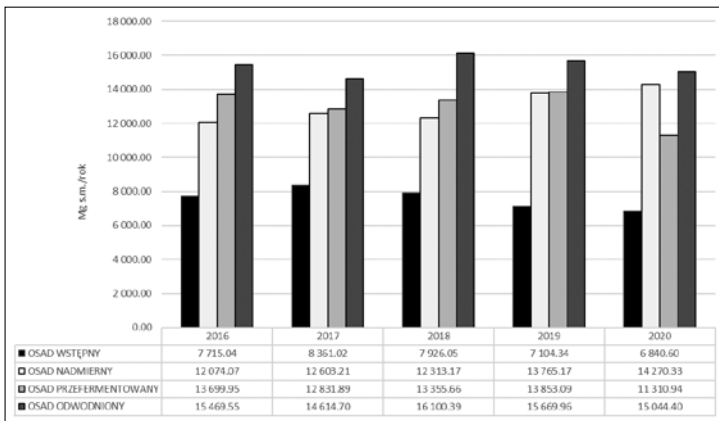
W latach 2016-2021, w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów, 85% osadów ściekowych zostało spalonych w termicznej stacji utylizacji osadów ściekowych, natomiast około 15% osadów zostało wywiezionych poza teren oczyszczalni przez wyspecjalizowane firmy zewnętrzne.



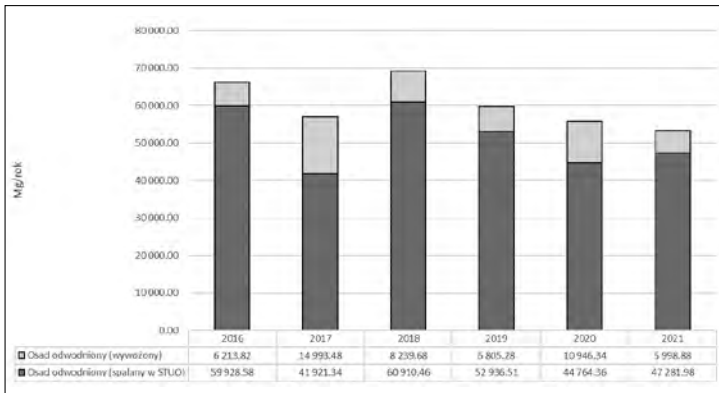
Rys. 1.

Schemat technologiczny oczyszczalni ścieków Kraków-Płaszów [źródło własne]

Fig. 1. Technological scheme of the Kraków-Płaszów sewage treatment plant [own source]



Rys. 2. Bilans ilościowy osadów ściekowych w latach 2016 – 2020 dla Oczyszczalni Ścieków Kraków – Płaszów
Fig. 2. Quantity balance of sewage sludge in 2016 – 2020 for Kraków – Płaszów WWTP



Rys. 3. Bilans ilościowy osadów odwadnionych w latach 2016 – 2021 dla Oczyszczalni Ścieków Kraków – Płaszów
Fig. 3. Quantity balance of dewatered sludge in 2016 – 2021 for Kraków – Płaszów WWTP

Bilans energetyczny

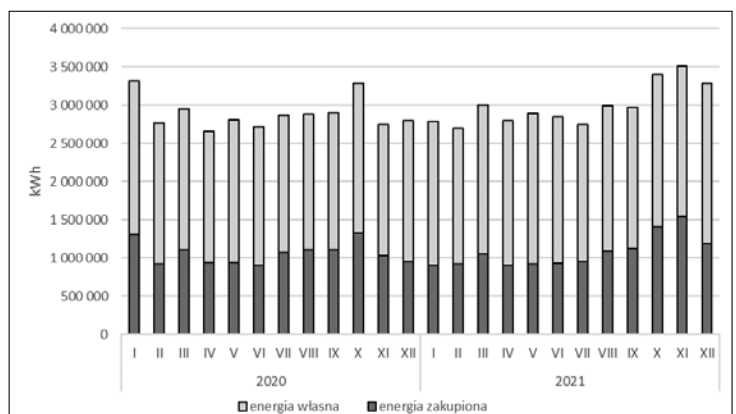
Wprowadzanie wysokoefektywnych metod oczyszczania ścieków powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię w przedsiębiorstwie. Dlatego, istotne jest wykonywanie audytów energetycznych dla oczyszczalni ścieków określających wielkości zużycia jednostkowych procesów oczyszczania. Ze względu na to, że wprowadzona technologia w oczyszczalniach ścieków jest bardzo energochłonna, celowe staje się zmniejszanie poboru źródła energii z „zewnątrz” poprzez stosowanie własnych, odnawialnych źródeł energii. Również w czasie eksploatacji ważne jest ustalenie optymalnych parametrów pracy poszczególnych obiektów lub urządzeń, które zapewniają minimalizację zużycia energii elektrycznej. Bilans energetyczny oczyszczalni można poprawić przez zmniejszenie zużycia energii lub zwiększenie udziału energii odnawialnej (energia własna) w celu pokrycia zapotrzebowania na energię.

Energia własna to energia pochodząca z odnawialnych źródeł energii, czyli w przypadku opisywanej oczyszczalni jest to:

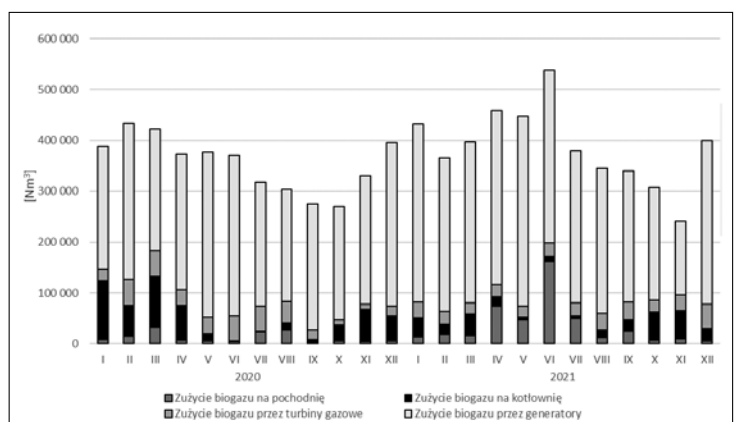
- biogaz, jako produkt fermentacji metabolicznej, wykorzystany w systemie kogeneracji do wytworzenia energii cieplnej i elektrycznej;
- zestaw 240 paneli fotowoltaicznych, których moc wynosi 60 kW, a produkcja ok. 60 MWh;
- turbina Kaplana, zainstalowana na odpływie ścieków oczyszczonych, z podwójną regulacją przez kierownicę z ruchomymi

łopatkami oraz wirnik z ruchomymi łopatkami, potrójną regulacją przez użycie dodatkowo generatora z magnesami trwałymi – uzyskiwana moc elektryczna turboszespołu przy przepływie 2 m³/s wynosi 50 kW;

Rys. 4. Ilość energii elektrycznej wykorzystanej w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów w latach 2020-2021
Fig. 4. Amount of electricity used at the Krakow – Płaszów WWTP in 2020 – 2021



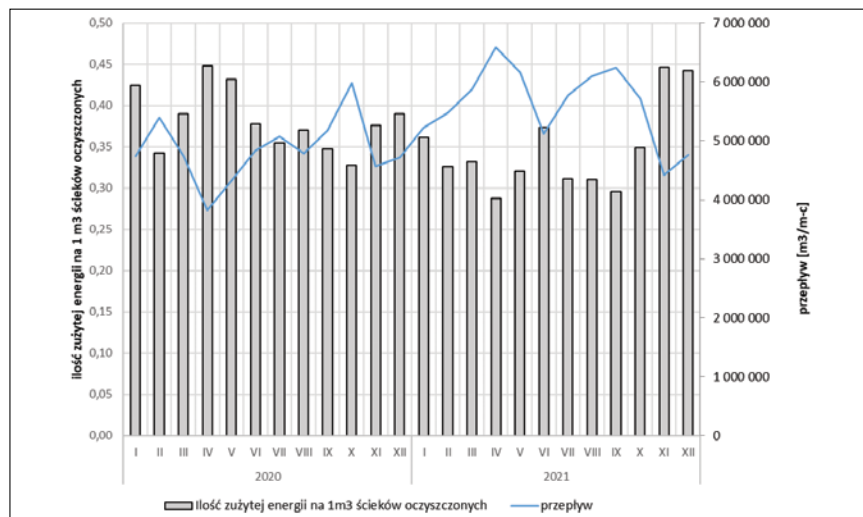
Rys. 5. Zużycie energii własnej (biogazu) przez poszczególne urządzenia w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów
Fig. 5. Energy consumption (biogas) for individual devices at the Krakow – Płaszów WWTP



d) zespół dwóch turbin gazowych, każda o mocy elektrycznej nominalnej wynoszącej 65 kW oraz mocy cieplnej 100 kW.

Na rysunku 4 przedstawiono ilość energii własnej oraz energii zakupionej z zewnątrz, wykorzystywanej w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów w latach 2020 -2021.

Analizując dane przedstawione na rysunku 4 można zauważyć, że zakres zapotrzebowania energii w oczyszczalni waha się pomiędzy 2,5 a 3,5 mln kWh. Ilość energii zakupionej zależy od konieczności uzupełniania własnych zasobów energetycznych oczyszczalni, wynikających z różnicy eksploatacji urządzeń i efektywności procesów technologicznych ze względu na zmieniające się warunki atmosferyczne (np. różny stopień nawietrzania reaktorów biologicznych). Widać, że okres jesienno-zimowy jest bardziej energochłonny niż pozostała część roku, co nie jest specjalnym zaskoczeniem. Natomiast biorąc pod uwagę zużycie biogazu przez wybrane urządzenia: kogeneratory, pochodnię, turbiny gazowe i kotłownię (rys. 5), możemy stwierdzić, że największym jego „konsumentem” są generatory, które produkują zarówno energię elektryczną jak i ciepło. Biogaz wykorzystywany jest przez kotłownię, która wytwarza ciepło w celu podniesienia i utrzymania temperatury procesowej w wydzielonych komorach fermentacji oraz ogrzania pomieszczeń zakładowych i socjalnych zlokalizowanych w oczyszczalni ścieków. Biogaz również kierowany jest do turbin gazowych, które produkują energię elektryczną.



Rys. 6. Ilość zużytej energii na 1 m³ ścieków oczyszczonych oraz średni przepływ ścieków oczyszczonych w oczyszczalni Kraków-Płaszów

Fig. 6. Amount of energy consumed per m³ of treated wastewater and average flow of treated wastewater at Kraków-Płaszów Sewage Treatment Plant

Dobrym wskaźnikiem określającym energochłonność oczyszczalni jest określenie ilości zużytej energii na 1 m³ ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika. Wielkość jednostkowego zużycia energii elektrycznej w krajach europejskich waha się w granicach od 0,36 do 0,67 kWh/m³ oczyszczonych ścieków [12].

Na rysunku 6 zestawiono ilość zużytej energii na 1 m³ ścieków oczyszczonych wraz z miesięcznym natężeniem przepływu w okresie dwóch lat. Wartości te waha się w przedziale 0,31-0,45 kWh/m³. Średnia wartość tego wskaźnika w roku 2020 wyniosła 0,38 kWh/m³, a w roku 2021 – 0,34 kWh/m³. Zauważono, że im większa ilość ścieków oczyszczonych, tym wskaźnik jest niższy. Wartość tego parametru, w poszczególnych miesiącach roku jest nieregularna i nie odnotowano wpływu sezonowości.

Podsumowanie i wnioski

Wzrost liczby ludności, zastosowanie nowoczesnych, efektywniejszych technologii oczyszczania ścieków skutkuje znaczącym wzrostem ilości wytwarzanych osadów ściekowych [13]. Zaostrezenie wymogów legislacyjnych dotyczących jakości ścieków oczyszczonych odprowadzanych do odbiornika, jak również wzrastające wymagania prawne w zakresie gospodarki odpadami powodują konieczność właściwego przetwarzania osadów ściekowych. Stosowanie stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych i uzyskiwanie energetycznego biogazu stanowi dla oczyszczalni dodatkowe źródło energii, które w znaczący sposób poprawia bilans energetyczny przedsiębiorstwa.

W artykule przedstawiony został bilans ilościowy osadów ściekowych. Pomimo, że na świecie zauważamy tendencję wzrostową ilości powstających osadów ściekowych, w Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów prowadzi się gospodarkę osadową w kierunku

zmniejszania ilości tych odpadów technologicznych. Niewątpliwie jest to efekt zastosowania wysokowydajnych urządzeń do przeróbki osadów wstępnych przefermentowanych i odwodnionych. Charakteryzując poszczególne obiekty związane z gospodarką osadową należy zwrócić na to uwagę, że osady wstępne i osady nadmierne poddawane są wspólnej stabilizacji w procesie fermentacji metanowej, a następnie odwadniane. Głównym kierunkiem zagospodarowania ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych jest ich termiczne przekształcenie w Stacji Termicznej Utylizacji Osadów Ściekowych – ok. 85% poddawanych jest temu procesowi. Natomiast pozostałe osady wywożone są poza teren oczyszczalni przez firmy zewnętrzne. Spopielanie ciekawej ilości osadów ściekowych nie jest możliwe ze względu na konieczne, okresowe przeglądy STUO – stacja jest wyłączana z eksploatacji na okres ok. miesiąca w roku.

Drugim bilansem omówionym w artykule jest bilans energetyczny. W Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów najwięcej energii własnej produkowanej jest przez kogeneratory, które, dzięki znacznej ilości biogazu pochodzącego z fermentacji metanowej osadów, wytwarzają zarówno energię elektryczną jak też ciepło. Dzięki zastosowaniu odnawialnych źródeł energii możliwe jest 100% pokrycie zapotrzebowania na ciepło oraz 40% zapotrzebowanie na energię elektryczną. Energetyczne wykorzystanie biogazu przynosi oczyszczalni ścieków wymierne korzyści zarówno ekologiczne, pozwalając na zmniejszenie emisji gazów zawierających metan oraz utylizację osadu ściekowego, jak i ekonomiczne, pozwalające na obniżenie kosztów bieżącej eksploatacji. Wprowadzenie jednostkowego wskaźnika, określającego zużycie energii elektrycznej na 1 m³ ścieków oczyszczonych daje możliwość szacowania wkładu energetycznego na potrzeby procesów technologicznych w linii ściekowej oczyszczalni. Dla oczyszczalni Kraków-Pła-

szów średnia wartość tego wskaźnika w roku 2020 wyniosła 0,38 kWh/m³, a w roku 2021 była na poziomie 0,34 kWh/m³. Z analizy zebranych i opracowanych danych można również wnioskować, że na wartość tego wskaźnika ma wpływ zmienność natężenia przepływu ścieków.

Przedstawione w niniejszym artykule analizy danych ilościowych osadów i wartości energetycznych związanych z efektywnością pracy oczyszczalni, stanowią wstęp do opracowania szerszego zakresu zagadnień obejmujących gospodarkę osadową w Obiektie Oczyszczalni Ścieków Kraków-Płaszów.

Badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, Program Doktorat Wdrożeniowy, DWD/5/0187/2021.

LITERATURA:

- [1] Bachorz M., *Polska droga do gospodarki o obiegu zamkniętym. Opis sytuacji i rekomendacje*, Instytut Gospodarki o Obiegu Zamkniętym, 2017.
- [2] Pichlak M., Kruczek M., *Circular Economy – Current State and Perspectives*, *Ekonomia XXI wieku*, 15, 2017, nr 3, str. 21-31, DOI: 10.15611/e21.2017.3.02
- [3] Zaborowska, E., Czerwionka, K., & Mąkinia, J. *Ocena strategii poprawy bilansu energii oczyszczalni ścieków przy wykorzystaniu modeli komputerowych*. Polimery i Koagulanty. Wartość Dodana, 2017. str. 11-25.
- [4] Krupa K., *Wybrane aspekty techniczno-ekonomiczne produkcji i wykorzystania biogazu na cele energetyczne: studium przypadku Oczyszczalni Ścieków Tychy-Urbanowice*, Instal, 2016, nr 2, str. 22-25.
- [5] Podedworna J., Umiejewska K., *Technologia osadów ściekowych*, Warszawa, Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej, 2008.
- [6] Jędrzak A., Królik D., *Wpływ rozdrobnienia makulatury oraz odpadów kuchennych na wydajność procesu fermentacji metanowej*, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2011, tom 13, str. 61-634.
- [7] Czyżyk F., Kozdraś M.: *Właściwości chemiczne i kompostowanie osadów z większych oczyszczalni ścieków*, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* tom 4, zeszyt 21 (11), 2004, str. 559-569.
- [8] Praca zbiorowa pod redakcją Zbyszława Dymaczeńskiego, *Poradnik Eksploatatora Oczyszczalni Ścieków*, Poznań, Polska 2011 r.
- [9] *Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów*, Dz. U. 2020, poz. 10.
- [10] Cimołowicz-Rybicka M., Łuszczek B., Poproch D., Górka J., *Proces współfermentacji osadów ściekowych z osadami z uzdatniania wody. Badania w skali pilotowej*, *Przemysł chemiczny*, 2021-9, str. 829-831, DOI: 10.15199/62.2021.9.8
- [11] Ministerstwo Środowiska, *Strategia postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi na lata 2019-2022*, 18 listopada 2018 r.
- [12] Hernández-Sancho F., Molinos-Senante M., Sala-Garrido R. *Energy efficient in Spanish wastewater treatment plants: A non radial DEA approach*. *Science of the Total Environment*, 2011, nr 409, str. 2693-2699.
- [13] Pyssa J., Milewska-Duda J., *Zastosowanie biotechnologii w procesach oczyszczania ścieków. Paliwa i energia XXI wieku* (red. G.S. Jodłowski). Wydawnictwo Naukowe „Akapiit”, Kraków, 2014, str. 323-336.