

Stanisław M. RYBICKI¹, Bartosz ŁUSZCZEK²

¹ Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Środowiskowych
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: smrybicki@interia.pl

² Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji SA
ul. Senatorska 1, 30-106 Kraków

Efektywność termicznego przekształcania osadów na tle innych metod zagospodarowania na przykładzie wybranej oczyszczalni ścieków

Oczyszczalnia ścieków Kraków-Płaszów (największy obiekt spośród dziewięciu oczyszczalni obsługujących aglomerację) została zmodernizowana w latach 2004-2007, tak że obecnie jest obiektem o przepustowości 165 tys. m³/dobę, składającym się z 5 reaktorów biologicznych i 10 osadników wtórnych. Przeróbkę osadu realizuje się w całkowicie nowym obiekcie, w którym prowadzi się zagęszczanie, fermentację metanową, końcowe odwadnianie oraz produkcję energii elektrycznej i ciepła użytkowego z gazu fermentacyjnego. W 2009 roku uruchomiono obiekt Stacji Termicznej Utylizacji Osadów o przepustowości średnio 64 ton suchej masy na dobę, spełniającej wymogi najlepszych dostępnych technik. Celem budowy była minimalizacja kosztów transportu i zagospodarowania osadów, jako że oczyszczalnia, która lokalizowana była przed półwieczem daleko poza miastem, obecnie w całości znajduje się wewnątrz gęsto zabudowanego obszaru. Dążenie do minimalizacji ryzyka związanego z transportem tzw. masy mokrej oraz chęć ogólnego obniżenia kosztów stały się podstawą zastosowania wybranej metody. W artykule przedstawiono wyniki z pierwszych lat eksploatacji obiektu. Na podstawie doświadczeń zebranych w trakcie eksploatacji pokazano, jakie problemy należało rozwiązać przy uruchamianiu i wstępnym eksploataowaniu tego obiektu, tak aby uzyskać stabilną, ekonomicznie uzasadnioną eksploatację obiektu. Wobec braku rzeczywistych możliwości rolniczego (czy tzw. „proekologicznego”) wykorzystania osadów (lokalizacja obiektu w dużej odległości od terenów uprawowych) metoda suszenia może być dobrą alternatywą zagospodarowania osadów, szczególnie dla dużych oczyszczalni, które zlokalizowane są w oddaleniu od obszarów intensywnie eksploatowanych rolniczo.

Słowa kluczowe: oczyszczanie ścieków, przeróbka osadów, suszenie osadów, termiczna przeróbka osadów

Wprowadzenie

Współczesne oczyszczalnie ścieków oparte są na wykorzystaniu wysokoefektywnych metod oczyszczania ścieków, w których biologiczne procesy przekształcania/usuwania związków biogennych wspomagane są metodami chemicznymi, co przyczynia się do istotnego wzrostu ilości generowanych osadów. Niejednokrotnie koszt ich przerobu, a także trudności wynikające z ich zagospodarowania stanowią nawet połowę kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni [1, 2].

Do najważniejszych cech charakterystycznych, decydujących o wyborze procesów technologicznych zastosowanych w linii przeróbki osadów, zalicza się wilgot-

ność, obecność związków podatnych na rozkład biologiczny czy też zdolność oddawania wody.

W ciągu ostatnich 20 lat konsekwencją intensyfikacji i modyfikowania procesów oczyszczania ścieków (implikowanych przez unijne regulacje prawne) jest zwiększanie się ilości osadów ściekowych powstających w poszczególnych obiektach. W Unii Europejskiej wzrost ten szacuje się na ok. 50% w stosunku do produkcji przed nową regulacją prawną, wynoszącą 6,5 mln ton w 1992 roku dla 15 tzw. „starych państw członkowskich”. Ilość osadów wyprodukowanych ze wszystkich krajów członkowskich w 2005 roku wynosiła już 10,9 mln ton. Analizując dane produkcji osadów w kolejnych latach, można stwierdzić, że wdrożenie Dyrektywy 91/271/EC (o oczyszczaniu ścieków miejskich) spowoduje dalszy wzrost ilości (masy i objętości) osadów i w 2020 roku wyniesie ona 13 mln ton rocznie [3].

Od dnia przystąpienia do Unii (1 maja 2004 r.) również Polskę obowiązują przepisy dotyczące zasad postępowania z osadami ściekowymi powstającymi w oczyszczalniach ścieków. Podstawowymi celami w gospodarce komunalnymi osadami ściekowymi przyjętymi w perspektywie do 2020 r. są:

- minimalizacja, a docelowo - rezygnacja ze składowania osadów ściekowych,
- zwiększenie udziału komunalnych osadów ściekowych przetwarzanych przed wprowadzeniem do środowiska oraz osadów przekształcanych metodami termicznymi,
- zwiększenie masy komunalnych osadów ściekowych wykorzystywanych w biogazowniach w celach energetycznych,
- wzrost masy komunalnych osadów ściekowych przekształcanych termicznie,
- maksymalizacja stopnia wykorzystania substancji biogennej zawartej w osadach przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów dotyczących bezpieczeństwa sanitarnego, chemicznego oraz środowiskowego.

Według danych Eurostatu [3] dotyczących ilości (masy) osadów wytwarzanych przez komunalne oczyszczalnie ścieków w Europie, widoczne jest różne podejście poszczególnych krajów do tego zagadnienia, mimo iż zasadniczo obowiązuje na tym obszarze działań wspólna polityka całej Unii Europejskiej. Tabela 1 zawiera syntezę danych o produkcji: całkowitej masy osadów, masy osadu na mieszkańca oraz dominujące w poszczególnych krajach metody przeróbki osadów dla wybranych krajów europejskich: Polski, krajów członkowskich UE sąsiadujących z Polską (z wyjątkiem Słowacji) oraz Austrii [3-5].

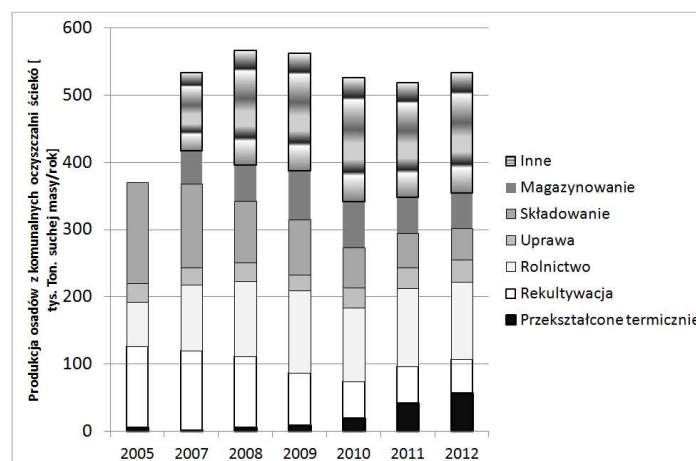
Średnia wartość jednostkowej masy wytwarzanych osadów ściekowych na jednego mieszkańca UE wynosi 23,0 kg/Mk·rok (wyrażone w suchej masie), przy czym najwyższą wartość tego wskaźnika odnotowano w Austrii (30,28), a najniższą w Polsce (14,76). Przyczyną tych różnic jest przede wszystkim ciągle jeszcze niski stopień przyłączenia polskich gospodarstw domowych do sieci kanalizacyjnej. Metodami końcowego zagospodarowania osadów dominującymi w Europie są: wykorzystanie rolnicze oraz kompostowanie, a także spalanie. Jednakże należy zwrócić uwagę, że kraj, w którym wytwarza się najwięcej osadu ogółem, czyli Niemcy, oraz kraj, wytwarzający największą masę osadów w przeliczeniu na mieszkańca, tzn. Austria, stosują te metody w takim samym stopniu. W pozostałych

państwach można wyróżnić jedną metodę dominującą: wyraźną przewagę metod rolniczych, co stosują (pokazane w tabeli 1) Czechy i Węgry, a także Wielka Brytania, Francja czy Hiszpania, oraz wyraźną przewagę spalania (np. w Holandii i Szwajcarii co najmniej 90% wytworzonych osadów jest poddawanych spalaniu). Specyficzna sytuacja ma miejsce w Polsce, gdzie w pozycji „Inne metody zagospodarowania” wykazywana jest ponad połowa całkowitej ilości (58%) [3, 5].

Tabela 1. Porównanie produkcji osadów ściekowych wybranych krajów europejskich oraz charakterystyczne dla nich procesy przeróbki (dane dla lat 2010-2012)
Table 1. Comparison of wastewater sludge production in selected European countries with dominating sludge handling methods (data for years 2010-2012)

Kraj	Całkowita produkcja tys. ton/rok	Sucha masa osadu na mieszkańca w roku kg/Mk·rok	Podstawowe procesy przeróbki osadów		
			rolnictwo/ kompostowanie	spalanie	inne
			procent w całkowitej produkcji		
Polska	563	14,76	26	2	58
Niemcy	2049	24,99	53	47	0
Węgry	260	25,95	60	1	10
Czechy	220	20,94	78	1	8
Austria	254	30,28	38	36	17

Podnoszenie efektywności oczyszczania ścieków w Polsce skutkuje tym, że całkowita roczna produkcja osadów w polskich oczyszczalniach ścieków wzrastała w latach 2000-2008. Jednakże w ostatnich latach, wobec zaostreżeń wymogów odnośnie do końcowego zagospodarowania, następuje powolny spadek tej ilości. Zmiany zachodzące w produkcji i zagospodarowaniu osadów w Polsce przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Trendy w produkcji i zagospodarowaniu osadów z miejskich oczyszczalni ścieków w Polsce w latach 2005-2012

Fig. 1. Trends in production and handling of municipal wastewater sludges in Poland from period 2005-2012

Zmiany te można tłumaczyć jako rezultat podjętych - począwszy od roku 1990 do chwili obecnej - działań inwestycyjnych i modernizacyjnych układów przeróbki osadów na oczyszczalniach komunalnych. W wyniku wprowadzonych zmian w zarządzaniu, optymalizacji pracy, eksploatacji oraz zastosowaniu nowych rozwiązań technologicznych w gospodarce osadowej zmniejszono ilości powstających osadów, a obecnie wysiłki optymalizacyjne przenoszą się na osiągnięcie korzyści ekonomicznych poprzez pozyskiwanie odnawialnych źródeł energii [2, 5, 6].

1. Metodyka badań

Dane wykorzystane w artykule zostały oparte na analizach ścieków i osadów pobieranych w oczyszczalni ścieków w Krakowie Płaszowie, a następnie wykonywanych w laboratoriach MPWiK SA w Krakowie. Próbki pobierano cztery razy w miesiącu (zazwyczaj raz w tygodniu) z ciągu przeróbki i oznaczano według następujących metod i procedur:

- i. według metod standaryzowanych wg PN-ISO:
 - stężenie ChZT PN-ISO 15705: 2005;
 - stężenie azotu amonowego PN-ISO 7150-1: 2002 (spektrofotometryczna);
 - stężenie azotu amonowego PN-ISO 5664: 2002 (destylacyjna z miareczkowaniem);
 - stężenie fosforu PN-EN ISO 6878: 2006, pkt 4, pkt 7;
- ii. według metod standaryzowanych wg PN-EN:
 - zawiesina ogólna PN -EN 872: 2007+Ap. 1;
 - stężenie BZT₅ nierozcieńcz. PN-EN 1899-2;
 - stężenie BZT₅ rozcieńczone PN-EN 1899-1;
 - azot Kjeldahla PN-EN 25663;
 - stężenie azotu azotanowego PN-82/C-04576/08;
 - sucha masa osadów PN-EN 12880: 2004;
 - zawartość substancji organicznych w osadach PN-EN 12879: 2004;
- iii. według metod opracowanych w Laboratorium MPWiK SA w Krakowie:
 - azot ogólny PB-NJL-S-23 Oznaczanie azotu ogólnego w ściekach. Metoda obliczeniowa wg PN-73 C-04576/14;
 - azot azotynowy PB-NJL-S-05 Oznaczanie azotu azotynowego w ściekach. Metoda dwuazowania wg HACH 8507.

Oprócz tego w artykule wykorzystano dane z oczyszczalni eksploatowanych przez MPWiK SA w Krakowie.

2. Oczyszczalnia Kraków-Płaszów

Celem artykułu jest przedstawienie i analiza wyników eksploatacji układu przeróbki osadów oczyszczalni Kraków-Płaszów, która przeszła drogę ewolucji

typową dla polskich warunków [2, 7, 8]. Wybrano ten obiekt, aby pokazać, czy i na ile wprowadzona technologia usprawniła w warunkach rzeczywistych gospodarkę osadową. Dokonano także porównania wskaźników jednostkowego zużycia energii elektrycznej i chemikaliów, co może stanowić punkt wyjścia do planowania i projektowania podobnych obiektów tego typu. Obecnie jest największą oczyszczalnią miasta Krakowa, do której dopływa ok. 78% wytworzonych w aglomeracji ścieków komunalnych (według przepływów średniodobowych). Obiekt, oddany do użytku w połowie lat 70. XX wieku jako oczyszczalnia mechaniczna, przez pierwsze dziesięciolecie eksploatacji praktycznie nie był wyposażony w układ przeróbki osadów, osad surowy był składowany na lagunach osadowych (gdzie w większości znajduje się - w formie przetworzonej - do dziś). Do 2007 roku oczyszczalnia nie posiadała ciągu biologicznego oczyszczania ścieków, natomiast układ przeróbki osadu był modyfikowany tak, aby uzyskiwać biogaz na drodze fermentacji mezo-filowej osadu wstępnego. W końcu XX wieku uruchomiono odwadnianie na prasach taśmowych i rozpoczęto systematyczne wykorzystanie biogazu do ogrzewania komór fermentacyjnych [7]. Tabela 2 zawiera zestawienie jakości ścieków surowych dopływających do oczyszczalni w latach 2009-2013.

Tabela 2. Jakość ścieków surowych dopływających do oczyszczalni Kraków-Płaszów w latach 2009-2013, średnia (Min.-Maks.)

Table 2. Quality of the raw wastewater inflowing Kraków-Płaszów WWTP in 2009-2013 period, average values (Min.-Max values in brackets)

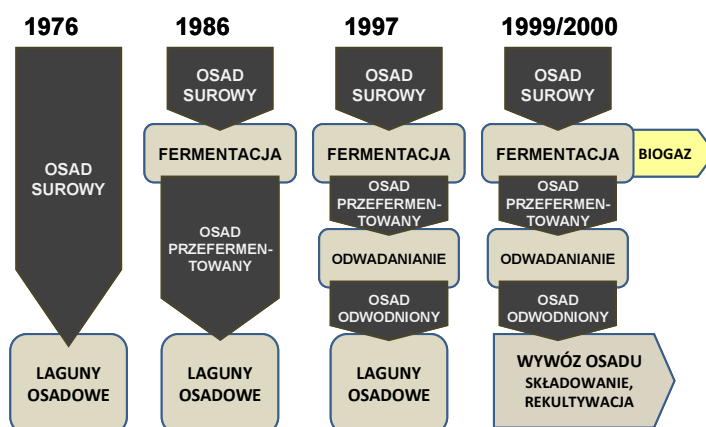
Wskaźnik	BZT ₅ mg/l	ChZT mg/l	Nog mg/l	Pog mg/l	Zawiesina mg/l
Wartość średnia (Min.-Maks.)	254 (42-620)	492 (126-1140)	48,3 (17,6-71,4)	5,19 (1,63-11,0)	299 (60-990)

Rysunek 2 pokazuje przebieg modernizacji [7]. W latach 2003-2007 przeprowadzono modernizację i rozbudowę całej oczyszczalni, w wyniku czego powstały praktycznie całkowicie nowe: linia oczyszczania ścieków oraz linia przeróbki osadów ściekowych.

W roku 2010 zakończono ostatni etap będący przedmiotem tego artykułu: budowę Stacji Termicznej Utylizacji Osadów (STUO). Obecnie układ przeróbki osadów obejmuje następujące procesy:

- Osad wstępny kierowany był początkowo do czterech zagęszczaczy grawitacyjnych pełniących funkcję fermenterów, a po zagęszczeniu przepływał do zbiornika operacyjnego przed WKF. Po około rocznej eksploatacji zrezygnowano z zagęszczania osadu wstępnego w zagęszczaczach/fermenterach. Problemy z szybkim zagęszczaniem, pompowaniem zbyt gęstego osadu oraz szybkim zużywaniem urządzeń nie pozwalały na utrzymanie odpowiednio długiego czasu zatrzymania dla produkcji LKT. Ze względu na duże objętości lejów w osadnikach wstępnych możliwe jest prowadzenie w nich zagęszczania.
- Osad nadmierny trafia z reaktorów biologicznych do zbiornika pośredniego, a następnie do trzech zagęszczarek taśmowych, po czym do zbiornika operacyjnego przed WKF.

- Zmieszane osady zagęszczone trafiają do czterech wydzielonych komór fermentacji o objętości 5000 m³ każda.
- Osad przefermentowany trafia do dwóch zbiorników (każdy o objętości 1500 m³), skąd podawany jest do układu odwadniania, który od 2001 roku składa się z wirówki dekantacyjnej i trzech pras.
- Część strumienia osadu nadmiernego zagęszczonego poddawana jest procesowi dezintegracji hydromechanicznej (homogenizacji ciśnieniowej) i może być podawana do reaktorów biologicznych bądź do fermentacji.
- Biogaz uzyskany w wyniku fermentacji jest odsiarczany metodą katalityczną i wykorzystywany do wytwarzania energii i ciepła w instalacji kogeneracji pozwalającej dodatkowo na odzysk energii elektrycznej (dwie jednostki o mocy nominalnej (elektrycznej) 0,8 MW każda).
- Dodatkowe obiekty części osadowej to: pompownia i zbiornik podgrzewania flotatu (z piaskowników i osadników wstępnych) przed podaniem do fermentacji oraz pompownia osadu dowożonego, gdzie trafia osad ustabilizowany z oczyszczalni lokalnych, podawany następnie do zbiorników osadu przefermentowanego.



Rys. 2. Zmiany w gospodarce osadowej oczyszczalni Kraków-Plaszów przed modernizacją i rozbudową [7]

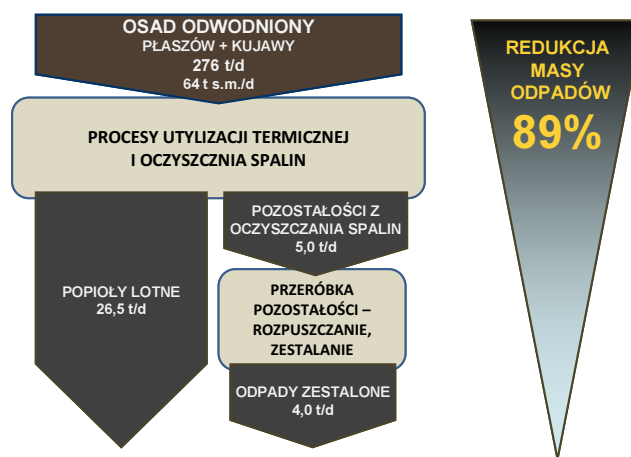
Fig. 2. Changes in sludge processing train in Kraków-Plaszów WWTP prior to modernization and expansion [7]

Najnowszym obiektem służącym do końcowego przetworzenia osadów jest STUO, której zadaniem jest przeróbka osadów odwodnionych z oczyszczalni Kraków-Plaszów oraz z drugiej, mniejszej oczyszczalni „Kujawy” (średni dobowy dopływ ścieków 52 tys. m³/d), tym samym zamykając problem zagospodarowania osadów dla całej gminy Kraków. Osady trafiające do instalacji (o wydajności nominalnej 64 Mg s.m./d) są wstępnie suszone do osiągnięcia ok. 36% s.m., co ma zapewnić autotermiczność procesu spalania w piecu fluidalnym typu PYROFLUID[®]. W pierwszym wymienniku ciepła realizowany jest odzysk ciepła ze spalin do powietrza fluidyzacyjnego. Drugi wymiennik stanowi wytwornicę pary do podsuszania osadu. Jako dodatkowe paliwo do wytwarzania pary oraz uzupełniania bilansu w okresie rozruchu bądź

zakłóceń w pracy pieca stosowany jest gaz ziemny. Oczyszczanie spalin prowadzone jest w technologii suchej w układzie dwustopniowego odpylania (multicyklon, elektrofiltr) oraz usuwania zanieczyszczeń kwaśnych i metali ciężkich poprzez dawkowanie wodorowęglanu sodu i węgla aktywnego przed filtr workowy.

Dodatkowo w celu usuwania NO_x zastosowano technologię SNCR (selektywna redukcja niekatalityczna), prowadzoną przez wtrysk wody amoniakalnej do wylotu spalin z pieca. W instalacji powstają dwa podstawowe rodzaje odpadów: popioły z multicyklonu i elektrofiltra oraz pozostałości z oczyszczania spalin.

Rysunek 3 przedstawia uproszczony bilans osadów według wielkości projektowych.



Rys. 3. Projektowy bilans masy odpadów w stacji termicznego unieszkodliwiania osadów oczyszczalni Kraków-Płaszów [7]

Fig. 3. Design mass balance for wastes discharged from thermal processing plant at the Kraków-Płaszów WWTP [7]

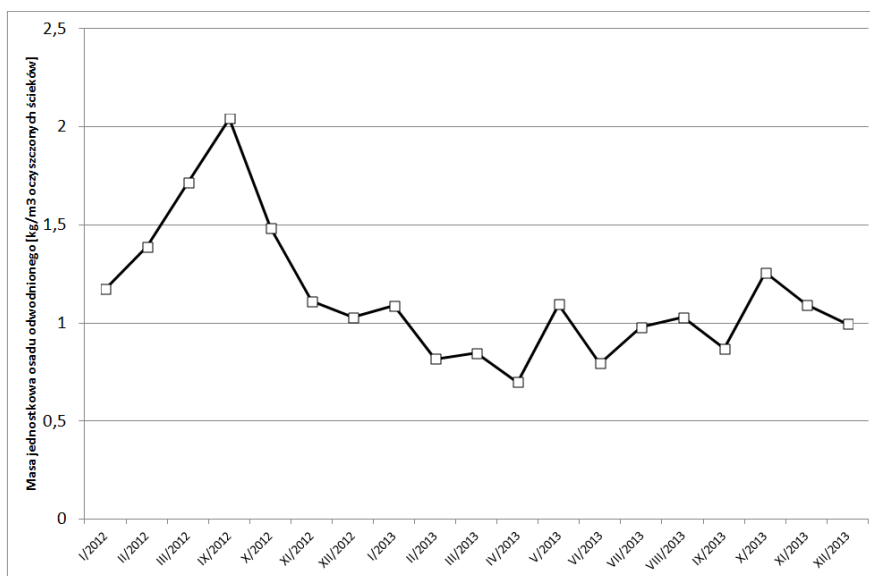
W celu zmniejszenia ilości pozostałości z oczyszczania spalin zastosowano proces rozpuszczania pozostałości i wymywania frakcji rozpuszczalnej (chlorki, siarczany) w postaci ścieków, pozwalający na ok. 50% redukcję masy. Dodatkowo przewidziano możliwość zestalania pozostałości z procesu wymywania.

3. Gospodarka osadowa w oczyszczalni Kraków-Płaszów w okresie 2012-2013

Do porównań przyjęto okres całych lat 2012 i 2013, czyli po zakończeniu rozruchu instalacji, choć w 2012 roku stacja odnotowała ponad czteromiesięczny okres obniżonej sprawności, związany z koniecznością gwarancyjnej regulacji instalacji i jej ponownego włączenia do systemu (okres ten został wyłączony z analizy pracy oczyszczalni zawartej w tym artykule). W okresie przyjętym do porównań średni miesięczny dopływ ścieków do oczyszczalni Kraków-Płaszów wynosił ok. 4380 tys. m^3 /miesiąc (średnio 143 600 m^3 /d), co stanowiło ok. 85% wydajności projektowej dla pory suchej. Wahania ilości ścieków dopływających wynosiły od 3433 do 6431 tys. m^3 /miesiąc. Masa osadów przefermentowanych w WKFz i od-

wodnionych na prasach taśmowych, kierowanych do STUO, wynosiła średnio 3614 ton/miesiąc (maksymalnie 7266 ton/miesiąc wobec założonej w projekcie wartości maksymalnej ok. 8400 ton/miesiąc [7]).

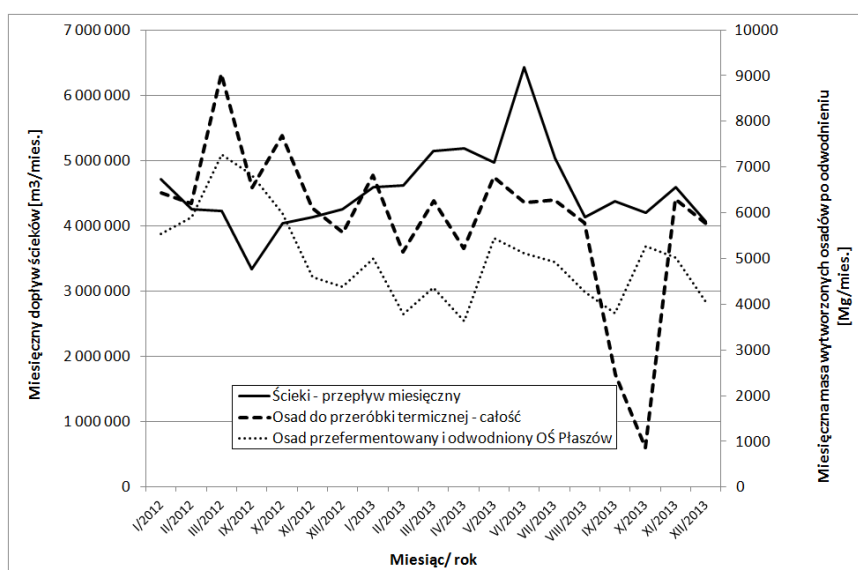
Masa osadu przefermentowanego i odwodnionego (czyli przygotowanego do przeróbki termicznej) w przeliczeniu na m^3 oczyszczonych ścieków wykazywała znaczące wahania w okresie obserwacji, wartość średnia wynosiła $1,13 \text{ kg}/m^3$ (minimalna: $0,70$, a maksymalna miesięczna $1,13 \text{ kg}/m^3$), co pokazuje rysunek 4. Zmienność tę można przypisać specyfice kanalizacji miasta Krakowa, która obejmuje także blisko stuletnie obszary kanalizacji ogólnospławnej o znaczących nieszczelnościach.



Rys. 4. Zmienność jednostkowej masy osadu przefermentowanego i odwodnionego z oczyszczalni ścieków Kraków-Płaszów - wartości średnie miesięczne

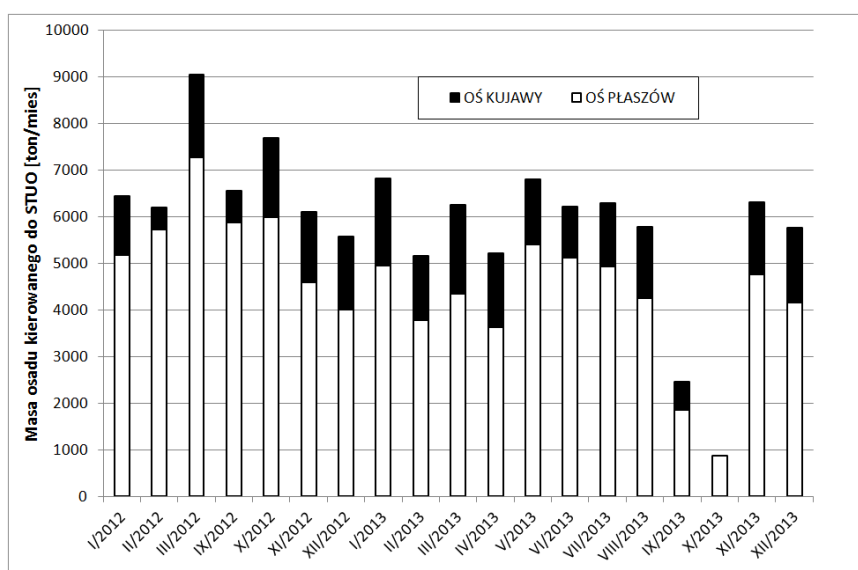
Fig. 4. Variability of unit mass production of digested sludge at the Kraków-Płaszów WWTP - monthly averages

Osad podawany do STUO charakteryzował się średnią zawartością suchej masy równej $22,11\% (\pm 5\%)$, co jest bardzo zbliżone dla założonej w projekcie wartości 23% , średnia zawartość substancji organicznych w suchej masie wynosiła $56\% (\pm 5\%)$. Nie stwierdzono zbieżności pomiędzy miesięczną objętością oczyszczonych ścieków a miesięczną produkcją osadu, co pokazuje rysunek 5. Na rysunku tym pokazano miesięczne ilości (masę) osadu z oczyszczalni Kraków-Płaszów (linią przerywaną) oraz całości osadów kierowanych do przeróbki termicznej. Osady te uzupełniane były przez dostawę z oczyszczalni „Kujawy” osadów przefermentowanych i odwodnionych, których masa uwodniona oscylowała około 25% masy osadów z oczyszczalni Kraków-Płaszów. Takie rozwiązanie pozwalało na lepsze - zbliżone do parametrów projektowych - wykorzystanie instalacji do termicznej przeróbki osadów.



Rys. 5. Przebieg zmienności natężenia ścieków dopływających oraz masy osadu kierowanego do przeróbki termicznej z oczyszczalni ścieków Kraków-Plaszów - wartości średnie miesięczne

Fig. 5. Variability of wastewater inflow and mass of sludge directed to thermal processing at the Kraków-Plaszów WWTP - monthly average values



Rys. 6. Udział osadów z poszczególnych oczyszczalni ścieków w całkowitej masie osadu odwodnionego, kierowanego do przeróbki termicznej - wartości średnie miesięczne

Fig. 6. Share of sludge from both WWTPs, directed to thermal processing - monthly average values

4. Efektywność suszenia osadów w Stacji Termicznej Utylizacji Osadów w okresie 2012-2013

Stacja termicznej przeróbki - w okresie opisywanym - wytwarzała jako produkt końcowy około 500 ton odpadów miesięcznie (tab. 3). Na masę tych odpadów składała się przede wszystkim suma masy popiołów oraz odpadów stałych z oczyszczania gazów spalinowych.

Tabela 3. Masa osadów kierowanych do termicznego przetworzenia oraz masa odpadów końcowych Stacji Termicznej Utylizacji Osadów w latach 2012-2013

Table 3. Sludge mass directed to thermal processing and final mass of processed sludge (years 2012-2013)

Wskaźnik	Jednostka	Wartość projektowa ¹	Wartość średnia	Wartość minimalna ²	Wartość maksymalna
Miesięczna masa osadów do przeróbki	ton/m-c	8418	6144	2457	
Miesięczna masa popiołów	ton/m-c	808	438,3	264,9	686,3
Miesięczna masa odpadów z oczyszczania gazów spalinowych	ton/m-c	122	71,4	18,4	130,8

¹ obliczona z wartości projektowej dobowej pomnożonej przez 30,5

² wyznaczona dla miesięcy bez przerw w pracy

Czas pracy układu do przeróbki termicznej w ciągu doby też ulegał znaczącym wahaniom, ale oscylował wokół średniej (z miesięcy bez przerw w pracy) 20 godzin na dobę (w miesiącach o najkrótszej pracy wartość ta wynosiła ok. 15 godzin na dobę, w miesiącach o pracy długotrwałej sięgała średnio aż 23 godzin pracy na dobę. Na wartości średnie wpływ, oprócz wyłączeń np. konserwacyjnych, miały przerwy w okolicy świąt).

Rysunek 7 pokazuje zmienność masy odpadów oraz ich strukturę w ujęciu miesięcznym na tle wartości wynikających z założeń projektowych.

Efektywność stacji termicznej utylizacji osadów wyznaczono, porównując masę osadów prefermentowanych i odwodnionych do typowej zawartości suchej masy ok. 22% z masą łączną odpadów stałych otrzymywanych jako produkt końcowy termicznej utylizacji osadów. Jako parametr porównawczy przyjęto - pokazane na rysunku 8 - względne zmniejszenie masy odpadu określone jako:

$$E_t = \frac{M_{fo} - M_{pp}}{M_{fo}}$$

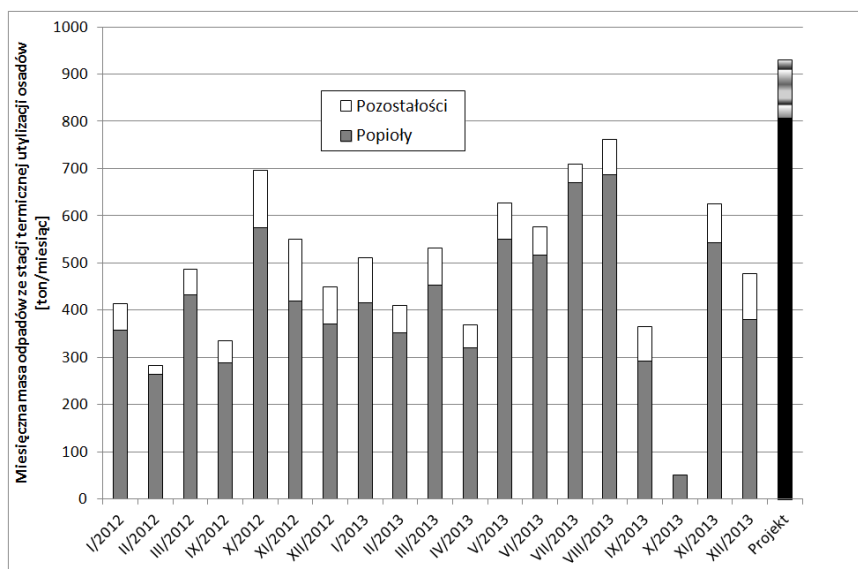
gdzie:

E_t - efektywność modernizacji układu przeróbki osadów, %,

M_{fo} - miesięczna masa osadów prefermentowanych i odwodnionych, ton/miesiąc,

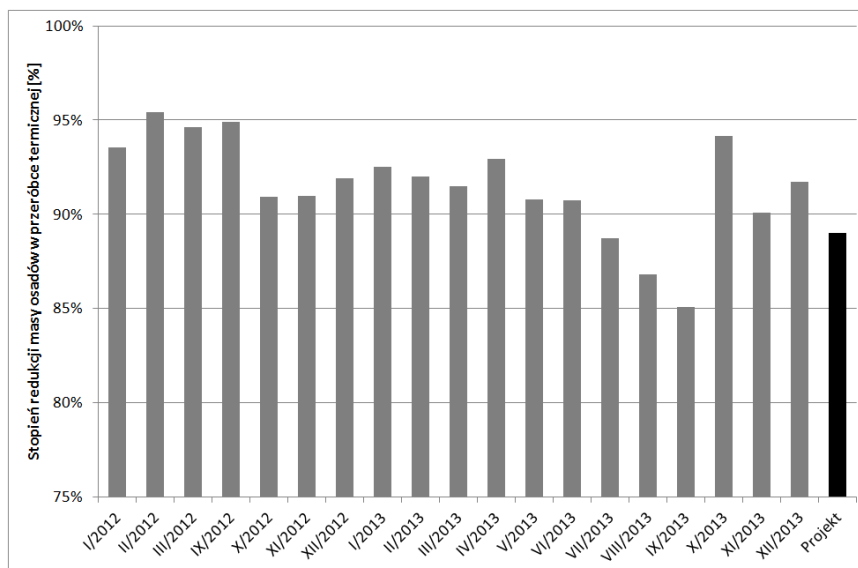
M_{pp} - miesięczna masa osadów termicznie przekształconych, ton/miesiąc.

Parametr ten pozwala na porównanie względnych kosztów wywozu i końcowego zagospodarowania osadów - metodą konwencjonalną (osad prefermentowany i odwodniony) oraz produktu końcowego przeróbki termicznej.



Rys. 7. Miesięczna masa odpadów z układu termicznej przeróbki osadów - wartości średnie miesięczne

Fig. 7. Monthly mass of waste from thermal processing unit - monthly average values



Rys. 8. Efektywność termicznej przeróbki osadów w poszczególnych miesiącach

Fig. 8. Efficiency of thermal processing in consecutive months of operation

Rysunek 8 pokazuje efektywność procesu - w porównaniu do metody alternatywnej - w oparciu o średnie miesięczne okresu obserwacji. Można stwierdzić,

że założona efektywność - osiągnięcie 89% zmniejszenia masy odpadów - została osiągnięta przez większą część okresu obserwacji, a przez 80% czasu eksploatacji urządzeń efektywność jest wyższa od projektowej. Średnie obniżenie masy odpadów wyniosło 91,4%, a maksymalne miesięczne aż 95,4%, co wskazuje na nawet dwudziestokrotne zmniejszenie masy odpadów w stosunku do metody konwencjonalnej końcowej przeróbki osadów.

5. Wpływ układu przeróbki osadów na parametry eksploatacyjne oczyszczalni

Praca układu termicznego unieszkodliwiania osadów - w stosunku do układów konwencjonalnych - powoduje, oprócz oczywistych kosztów inwestycyjnych, także wyraźne, dodatkowe koszty eksploatacyjne. Są one spowodowane dwoma podstawowymi czynnikami: kosztem zakupu środków chemicznych (przede wszystkim: wodorowęglan sodu, węgiel aktywowany, sól, koagulant, woda) oraz kosztami gazu i energii elektrycznej niezbędnych dla zapewnienia odpowiednich warunków termicznych. W tabeli 4 przedstawiono jednostkowe wskaźniki zużycia środków chemicznych w przeliczeniu na 1 tonę osadu kierowanego do przeróbki termicznej. Rozbieżność zużycia miesięcznego może być tu spowodowana bardziej metodyką księgowania zakupów niż względami technologicznymi.

Tabela 4. Jednostkowe wskaźniki zużycia środków chemicznych w przeliczeniu na 1 tonę osadu kierowanego do przeróbki termicznej w latach 2012-2013

Table 4. Unit consumption of chemicals per 1 ton of sludge directed to thermal utilization (years 2012-2013)

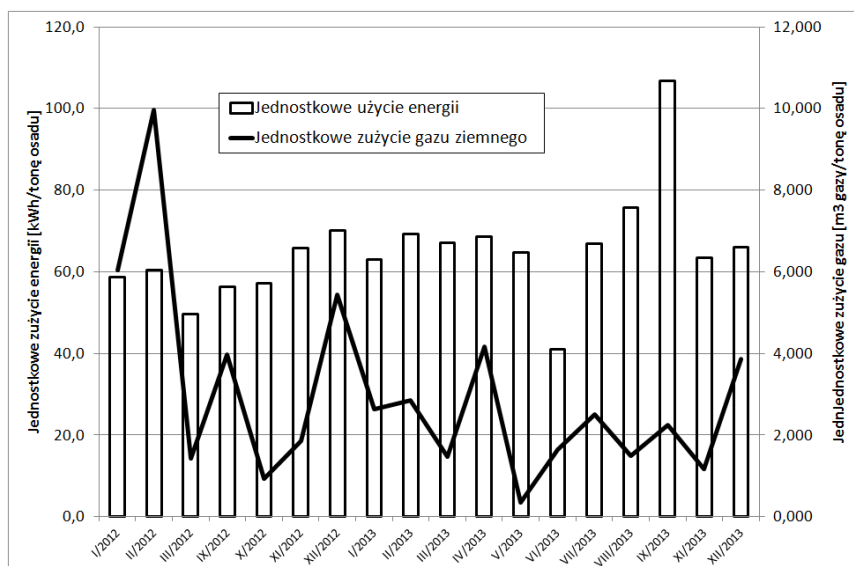
Wskaźnik	Jednostka	Wartość średnia	Wartość minimalna ¹	Wartość maksymalna
Jednostkowe zużycie NaCO ₃	kg/tonę osadu	15,4	7,74	20,35
Jednostkowe zużycie węgla aktywnego	kg/tonę osadu	0,127	–	0,256
Jednostkowe zużycie soli	kg/tonę osadu	0,082	–	0,260
Jednostkowe zużycie energii elektrycznej	kWh/tonę osadu	65,00	41,0	106,7
Jednostkowe zużycie gazu ziemnego	Nm ³ /tonę osadu	3,0	0,34	9,96

¹ wyznaczona dla miesięcy bez przerw w pracy

Na rysunku 9 przedstawiono natomiast miesięczne wartości jednostkowego zużycia gazu i energii elektrycznej, wskazujące na relatywnie nieznaczne zużycie tych czynników.

Wykazane w tabeli 4 podwyższone zużycie energii w początkowym okresie eksploatacji nie stanowi zaskoczenia, w okresie normalnej eksploatacji jednostkowe zużycie energii elektrycznej oscylowało wokół 30 kWh/tonę osadu. Z przyczyn

konstrukcyjnych (wymagana stałość składu) w STUO do celów spalania stosowany jest gaz ziemny, natomiast biogaz stosowany jest wyłącznie w układzie kogeneracji do produkcji energii elektrycznej i ciepła użytkowego.



Rys. 9. Jednostkowe zużycie gazu ziemnego i energii elektrycznej do termicznej przeróbki osadów

Fig. 9. Unit gas and electrical energy consumption in thermal processing unit

Dodatkowym argumentem za rezygnacją z biogazu jako medium wykorzystywanego w termicznej przeróbce osadów w przypadku oczyszczalni Kraków-Płaszów jest specyfika uregulowań prawnych w Polsce, polegająca na premiowaniu tzw. zielonymi certyfikatami wytwarzanie energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. Dlatego Eksploatator jest „nakłaniany” do wytwarzania jak największej ilości energii elektrycznej z biogazu przy jednoczesnym eksploatowaniu systemu zaopatrzenia w gaz ziemny. Zagadnienie to wykracza jednak poza ramy tego artykułu.

Jako ostatni wskaźnik analizowano, w jakim stopniu wykorzystanie gazu fermentacyjnego w instalacji STUO obniży możliwość wykorzystania tego nośnika energii do innych celów.

Porównanie objętościowe zużycia gazu ziemnego do przeróbki termicznej z wyprodukowanym biogazem dało w zakresie wartości średnich miesięcznych następujące wyniki:

- objętość gazu ziemnego zużytego w instalacji STUO stanowiła średnio 5,4% objętości biogazu wytworzonego w oczyszczalni Kraków-Płaszów (maksymalnie 19,6%);
- objętość gazu ziemnego zużytego w instalacji STUO stanowiła średnio 7,9% objętości gazu wykorzystywanego w oczyszczalni Kraków-Płaszów do celów technologicznych (maksymalnie 36,2%).

Zatem, gdyby zastosować układ technologiczny STUO wykorzystujący biogaz o stabilnym składzie, to praca takiego układu termicznego unieszkodliwiania osadów nie uszczuplałaby znacząco dyspozycyjnych zasobów gazu fermentacyjnego (biogazu).

Wnioski

- Metoda termicznego przekształcania (spalania osadów ściekowych z oczyszczalni komunalnych) jest bardzo efektywnym sposobem zmniejszenia uciążliwości osadów ściekowych, a przede wszystkim znaczącego - ponad pięciokrotnego zmniejszenia masy odpadów.
- Zużycie środków chemicznych oraz energii elektrycznej i biogazu, po początkowym okresie znacznego jednostkowego zużycia, stabilizuje się na relatywnie niskich wartościach.
- Kierunkiem rozwoju, który wydaje się najbardziej korzystny, jest wykorzystanie gazu fermentacyjnego (biogazu) w procesie spalania, gdyż zapotrzebowanie na to medium nieznacznie tylko zmniejszałoby dyspozycyjne nadwyżki tego nośnika energii w skali oczyszczalni ścieków, mogłoby wyeliminować natomiast korzystanie z gazu ziemnego.

Literatura

- [1] Foresti E., Zaiat M., Vallero M., Anaerobic processes as the core technology for sustainable domestic wastewater treatment: Consolidated applications, new trends, perspectives, and challenges, *Rev. in Environ. Sci & Bio/Techn.* 2006, 5, 3-19.
- [2] Rybicki S.M., Kurbiel J., Energy saving by retrofitting WWTP from aerobic stabilization of wasted activated sludge to anaerobic digestion - case study, *Proc. of a Polish-Swedish Seminar, Joint Polish-Swedish Reports, Report No 7, Stockholm 2000.*
- [3] Cimochoicz-Rybicka M., Aktywność metanogenna osadów ściekowych poddanych beztlenowej stabilizacji z zastosowaniem dezintegracji ultradźwiękowej, *Monografie Politechniki Krakowskiej Nr 440, Kraków 2013.*
- [4] Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M., Wpływ termicznego kondycjonowania na efektywność odwadniania osadów ściekowych poddanych stabilizacji beztlenowej, *Inżynieria i Ochrona Środowiska 2010*, 13, 2, 103-109.
- [5] *Rocznik statystyczny „Ochrona Środowiska 2013”*, Wyd. GUS, Warszawa 2013.
- [6] Cimochoicz-Rybicka M., Rybicki S.M., Application of the sludge activity test to improve overall methane production using sludge sonication, *Proceedings of the 4th ASPIRE, Tokyo 2011.*
- [7] Łuszczek B., Gospodarka osadowa w oczyszczalni ścieków Płaszów w Krakowie. Doświadczenia z prowadzenia dezintegracji osadu nadmiernego, *Mat. IX Ogólnopolskiego Forum Wymiany Doświadczeń, Zakopane 2011.*
- [8] Cimochoicz-Rybicka M., Effect of anaerobic sludge composition on a biogas production, *Proc. of a Polish-Swedish Seminar, Joint Polish Swedish Reports, Report No 7, Stockholm 2000.*

Sludge Thermal Processing Efficiency Compared to Other Methods of Management on the Example of Selected Wastewater Treatment Plant

Wastewater treatment plant Krakow-Plaszow (the largest of the nine sewage treatment facilities serving the agglomeration), was upgraded between 2004 and 2007, so that it is an object with a capacity of 165 thousand m³/day, consisting of 5 bioreactors and 10 secondary settling tanks. Sludge processing is carried out in brand-new train consisting of sludge thickening, mesophilic digestion (with methane-rich gas production) the final dewatering and heat production of the fermentation gas. In year 2009 the Thermal Utilization of Sludge station was launched, with a capacity of 64 tons on average dry matter per day, fulfilling the requirements of best available techniques. The purpose of the construction was to minimize transport costs and land deposits, as the object Krakow-Plaszow, which half a century ago was located far outside the city, now is entirely located within the densely built-up area. Aiming to minimize the risks associated with the transport of so-called wet mass and the desire to reduce the overall cost became the basis for the application of the chosen method. The paper presents the results of the first years of operation of the facility. Based on experience gained during the operation shows which problems had to be solved at startup and initial exploitation of this property, so as to balance the production of biogas and energy recovery from it with needs drying sludge. In the absence of the real possibilities of agricultural (or so-called 'ecological') use of sludge (location of the object at a great distance from land cultivation) drying method may be a good alternative sludge management. Operational experiences proved that proposed method of thermal utilization of digested sludge is a reliable method leading to minimization of the burden on wastewater sludge and especially significant - more than five times - reducing the volume of total waste then an ecological footprint of the plant. Unit consumption of chemicals as well as electrical energy and biogas is relatively low comparing with other technologies. Use of a biogas produced on the plant for thermal stabilization only slightly reduces the disposable surplus of this energy carrier on a scale wastewater treatment plant.

Keywords: sewage, sewage sludge, agricultural and natural use of sewage sludge