

Wpływ sposobu zagospodarowania osadów ściekowych na bilans energii komunalnej oczyszczalni ścieków

Dr inż. Ewa Zaborowska

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Gospodarowanie energią stanowi jeden z istotnych elementów oceny efektywności działania oczyszczalni ścieków. Koszty energii mają wpływ nie tylko na bieżący rachunek ekonomiczny, ale też na przyszłe zastosowanie w praktyce przemysłowej zasad zrównoważonego rozwoju, obejmujących oszczędność paliw kopalnych i zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko [2]. Poszukuje się rozwiązań, które będą stanowiły kompromis między jakością odpływu, kosztami, kryteriami prawnymi i środowiskowymi [3].

W różnych krajach europejskich średnie zapotrzebowanie oczyszczalni na energię elektryczną wynosi $0,36 \div 0,64 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$ ścieków [5]; uzyskiwane wartości zależą m.in. od wielkości oczyszczalni, zastosowanej technologii, charakterystyki ścieków na dopływie i odpływie. Zapotrzebowanie na energię rośnie wraz z wzrostem strumienia objętości ścieków i ładunku zanieczyszczeń, a także na skutek coraz bardziej rygorystycznych regulacji prawnych. Bardziej efektywne metody oczyszczania oraz rozbudowa infrastruktury kanalizacyjnej skutkują wytwarzaniem większej ilości osadów ściekowych [1, 9]. W latach 2000-2010 ilość osadów wytwarzanych w komunalnych oczyszczalniach ścieków w Polsce wzrosła z 359,8 do 526,7 tys. t.s.m., tj. o 46% [7], przy czym przewiduje się dalszy jej wzrost [9].

Wybór właściwej technologii zagospodarowania osadów ściekowych jest zagadnieniem skomplikowanym; mają tu znaczenie takie czynniki jak: uwarunkowania lokalne i krajowe, kulturowe, historyczne, geograficzne, prawne, polityczne i ekonomiczne. W Unii Europejskiej rozpowszechnione są metody wykorzystania rolniczego, magazynowania na składowiskach, rekultywacji terenów i spalania [4, 6]. Spalanie całkowite stanowi jedną z metod termicznego unieszkodliwiania osadów ściekowych, realizowaną w odpowiednio przystosowanych paleniskach.

Za alternatywną metodę uważa się współspalanie osadów z odpadami komunalnymi, w zakładach energetycznych czy cementowniach [8, 9]. W 2010 r. 3,8% t.s.m. wytworzonych w oczyszczalniach komunalnych w Polsce przekształcono termicznie [7]. Jest to wciąż udział niewielki, choć wykazuje on tendencję rosnącą (w 2010 r. ponad trzykrotny wzrost w stosunku do 2000 r. [7]). Zwiększenie ilości komunalnych osadów ściekowych przekształcanych metodami termicznymi jest jednym z celów sformułowanych w „Krajowym planie gospodarki odpadami 2014” [9]. Termiczną utylizację poprzedza energochłonny i kosztowny proces suszenia. Usunięcie wody powoduje zmniejszenie objętości, wzrost wartości opałowej, a także ułatwia magazynowanie i transport osadów [2, 8]. Całkowicie wysuszony osad powinien zawierać > 85% suchej masy [2]. Wprowadzenie procesu suszenia do istniejącego układu technologicznego powoduje istotną zmianę bilansu energetycznego oczyszczalni ścieków. W celu zaspokojenia potrzeb suszarni mogą być wykorzystywane różne źródła energii, w tym kotły i zespoły kogeneracyjne zasilane biogazem i gazem ziemnym.

W artykule przedstawiono porównanie bilansu energii elektrycznej i ciepła oczyszczalni ścieków pracującej bez suszarni oraz wyposażonej w suszarnię osadów ściekowych. Pierwszy przypadek odnosi się do rolniczego wykorzystania przefermentowanych i odwodnionych osadów; drugi przewiduje ich termiczną utylizację poza terenem oczyszczalni. Analizę oparto na wynikach pomiarów przeprowadzonych w warunkach eksploatacyjnych w komunalnej oczyszczalni ścieków w Grudziądzu.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Komunalna oczyszczalnia ścieków w Grudziądzu od 2002 r. przyjmuje ścieki z miasta i jego okolic. Projektowy nominalny średni strumień objętości ścieków wynosił 26 tys. m^3/d , a ładunek zanieczyszczeń odpowiadał 200 tys. RLM. W latach 2009-2011 średni roczny strumień objętości ścieków na dopływie kształtował się na poziomie $18,0 \div 19,5$ tys. m^3/d , a ładunek zanieczyszczeń $184 \div 195$ tys. RLM.

Dopływające do oczyszczalni ścieki są oczyszczane mechanicznie, a następnie metodą osadu czynnego. Wstępny i nadmierny osad ściekowy jest poddawany stabilizacji w dwóch wydzielonych, zamkniętych komorach fermentacyjnych o łącznej pojemności 4400 m^3 . Komory te są wyposażone w mieszałki oraz zewnętrzny obieg cyrkulacyjny przez spiralne wymienniki ciepła. W warunkach mezofilowych w komorach powstaje biogaz, który znajduje zastosowanie energetyczne na terenie oczyszczalni. Do 2009 r. odwodnione na prasach osady przefermentowane w całości były zagospodarowywane rolniczo. Po uruchomieniu suszarni taśmowej część osadów jest suszona (powyżej 90% s.m.), granulowana, a następnie transportowana do cementowni i poddawana utylizacji termicznej.

System ciepłno-energetyczny oczyszczalni obejmuje zasoby i źródła wewnętrzne oraz zewnętrzne. W obiekcie zainstalowano dwa biogazowe zespoły kogeneracyjne o mocy 165 kW_e każdy, biogazowe kotły oraz sprężarkowe pompy ciepła pobierające ciepło ze ścieków oczyszczonych. Dwupaliwowe palniki kotłów pozwalają na rezerwowe zasilanie lekkim olejem opałowym. Zewnętrzna sieć elektroenergetyczna uzupełnia zapotrzebowanie oczyszczalni na energię elektryczną. Ciepło jest wykorzystywane do ogrzewania fermentujących osadów ściekowych, ogrzewania i wentylacji budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Modernizacja obiektu polegająca na wybudowaniu taśmowej suszarni osadów ściekowych spowodowała zmiany w systemie zaopatrzenia w energię elektryczną i ciepło. Po okresie rozruchu suszarni rozpoczęła pracę w 2009 r. wraz z dwoma nowymi zespołami kogeneracyjnymi o mocy 200 kW_e i 345 kW_e oraz kotłem na gaz ziemny wysokometanowy.

Zestawienie znamionowej mocy elektrycznej i cieplnej źródeł energii zainstalowanych aktualnie w oczyszczalni podano w tabl. 1.

Tabl. 1. Zestawienie zainstalowanych w oczyszczalni źródeł energii elektrycznej i cieplnej

Urządzenie	Źródło energii pierwotnej	Nominalna moc elektryczna [kW _e]	Nominalna moc cieplna [kW _t]
Zespoły kogeneracyjne	Biogaz	330	528
	Gaz ziemny E	545	766
Kotły	Biogaz/olej opałowy	–	570
	Gaz ziemny E	–	895
Pompy ciepła (8/45°C)	Ścieki oczyszczone	–	165
Razem		875	2924

METODY POMIAROWE

Oczyszczalnię w Grudziądzu wyposażono w aparaturę pomiarową umożliwiającą ciągły monitoring parametrów procesów oraz wielkości związanych z gospodarką ściekowo-osadową i cieplno-energetyczną. Przy źródłach ciepła i odbiornikach zainstalowano ciepłomierze ultradźwiękowe. Odrębne pomiary prowadzono odpowiednio dla ciepła wytwarzanego w biogazowych i gazowych zespołach kogeneracyjnych, kotłach na biogaz i gaz ziemny oraz pompach ciepła, a także dla ciepła zużywanego w odbiornikach, takich jak: komory fermentacyjne, budynki oraz suszarnia osadów.

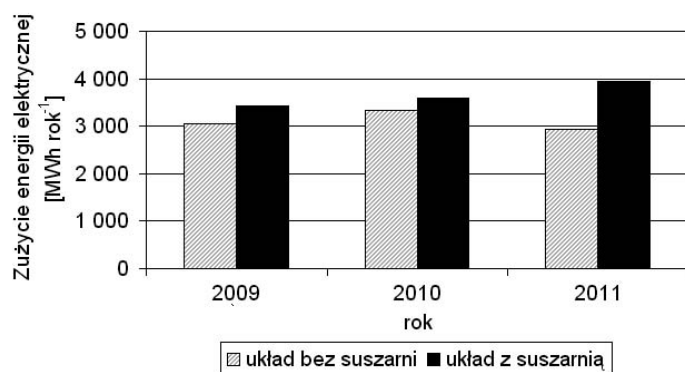
Pomiary temperatury były wykonywane głównie za pomocą czujnika rezystancyjnego – samodzielne lub stanowiące element składowy aparatury pomiarowej, np. ciepłomierzy. Przepływomierze ultradźwiękowe i elektromagnetyczne umożliwiały pomiar objętości dopływających i odpływających ścieków oraz osadów ściekowych w kluczowych miejscach układu technologicznego. Do pomiaru objętości biogazu były wykorzystywane termiczne przepływomierze masowe. Przedstawione w dalszej części wyniki opracowano na podstawie zmierzonych wartości sumarycznych lub średnich dobowych. W artykule zaprezentowano rezultaty uzyskane w latach 2009-2011, tj. w okresie po uruchomieniu suszarni osadów ściekowych. Dla energii elektrycznej przyjęto jednostkę odpowiadającą wielokrotności Wh_e, a dla ciepła Wh_t. Wskaźniki energochłonności przedstawiono jako wartości odniesione do jednostki objętości (m³) ścieków surowych dopływających do oczyszczalni.

REZULTATY I DISKUSJA

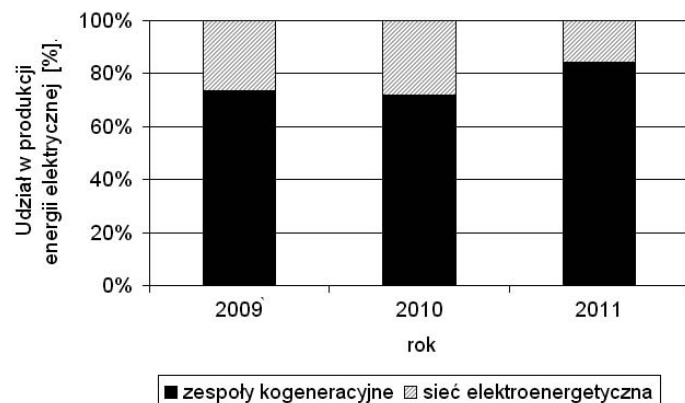
Sumaryczne zapotrzebowanie oczyszczalni ścieków na energię elektryczną w latach 2009-2011 wynosiło bez suszarni osadów 2930-3320 MWh_e/rok i było tym większe, im większy był strumień objętości ścieków oraz ładunek zanieczyszczeń. W odniesieniu do jednostki objętości ścieków surowych średnioroczna energochłonność obiektu była stosunkowo stabilna i zmieniała się w przedziale 0,42 ÷ 0,47 kWh_e/m³. Suszarnia prefermentowanych osadów ściekowych zużyła w rozważanym okresie 270 ÷ 1000 MWh_e/rok i spowodowała wzrost energochłonności obiektu do 0,51 ÷ 0,56 kWh_e/m³. W poszczególnych latach była ona wyższa o 8 ÷ 34% w stosunku do stanu pierwotnego i zależała głównie od ilości osadów skierowanych do suszenia. Całkowite roczne zapotrzebowanie oczyszczalni na energię elektryczną w układzie technologicznym bez suszarni i z suszarnią osadów ściekowych pokazano na rys. 1.

W rozważanym okresie bilans energii elektrycznej po stronie źródeł składał się z energii wytworzonej w zespołach kogeneracyjnych zasilanych biogazem i gazem ziemnym oraz energii pobranej z zewnętrznej sieci elektroenergetycznej. Wytwarzanie energii skojarzonej przez jednostki zasilane gazem ziemnym było związane głównie z działaniem i potrzebami suszarni osadów ściekowych. Zadaniem tych jednostek było częściowe uzupełnianie bilansu oczyszczalni, bez generowania nadwyżek energii oddawanej do sieci elektroenergetycznej. W takim układzie udział energii wytworzonej we wszystkich źródłach skojarzonych należących do oczyszczalni ścieków wynosił 72 ÷ 84% (rys. 2). Udział energii zakupionej ograniczył się do 16 ÷ 28% i ma potencjalne możliwości dalszej redukcji.

W strukturze zaopatrzenia w energię elektryczną oczyszczalni ścieków bez suszarni osadów (rys. 3) uwzględniono energię wy-



Rys. 1. Roczne zużycie energii elektrycznej w oczyszczalni ścieków bez suszarni i z suszarnią osadów



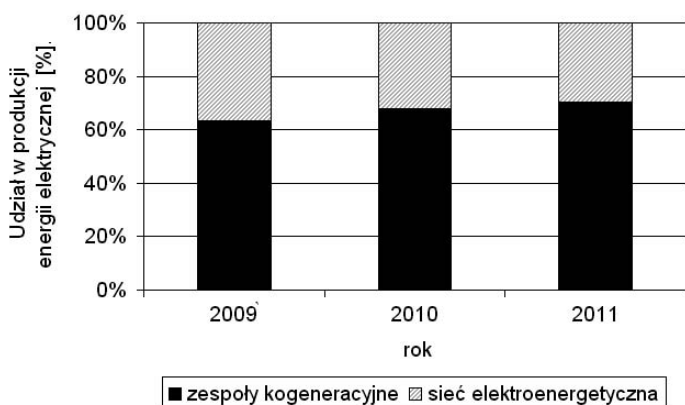
Rys. 2. Struktura zaopatrzenia w energię elektryczną oczyszczalni ścieków z suszarnią osadów

tworzoną w biogazowych zespołach kogeneracyjnych. Pozostałe zapotrzebowanie byłoby pokryte przez zewnętrzną sieć elektroenergetyczną. Taki układ technologiczny pozwala na pokrycie z odnawialnych źródeł wewnętrznych 64 ÷ 70% całkowitego zapotrzebowania oczyszczalni stosującej fermentację mezofilową i rolnicze wykorzystanie ustabilizowanych osadów ściekowych.

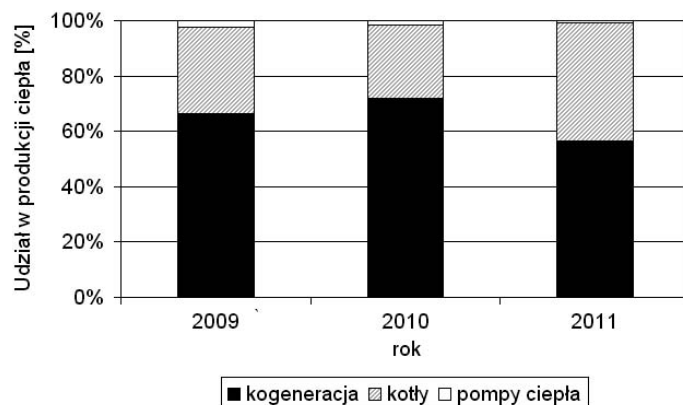
W latach 2009-2011 sumaryczne zużycie ciepła we wszystkich odbiornikach poza suszarnią wynosiło 2580 ÷ 2980 MWh/rok. Wraz z suszarnią osadów zapotrzebowanie na ciepło oczyszczalni w poszczególnych latach było wyższe o 50 ÷ 201% w porównaniu z obiektem pracującym bez suszarni i wynosiło 4450 ÷ 7750 MWh/rok (rys. 4). Jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło do podgrzania fermentujących osadów ściekowych oraz ogrzewania budynków zmieniało się w granicach 0,37 ÷ 0,42 kWh/m³. Proces suszenia przefermentowanych i odwodnionych osadów spowodował w poszczególnych latach wzrost ciepłochłonności do 0,63 ÷ 1,11 kWh/m³. W praktyce eksploatacyjnej do produkcji energii elektrycznej w układach skojarzonych wykorzystuje się cały dostępny strumień biogazu. Stąd w oczyszczalni pozbawionej suszarni lub innego dodatkowego odbiornika produkcja ciepła może w pewnych okresach przewyższać jego zapotrzebowanie. Wygenerowana nadwyżka ciepła jest rozpraszana do otoczenia przez instalacje ogrzewcze lub chłodnice wentylatorowe, a tym samym pozostaje niewykorzystana. W rozważanym przypadku nadmiarowa energia cieplna wytworzona w źródłach biogazowych wynosiła 32 ÷ 364 MWh/rok i była skierowana do suszenia osadów.

Strukturę produkcji ciepła w latach 2009-2011 w oczyszczalni wyposażonej w suszarnię osadów pokazano na rys. 5. Kogeneracja prowadzona w urządzeniach zasilanych biogazem i gazem ziemnym pokrywała 57 ÷ 72% rocznego zapotrzebowania oczyszczalni. Drugim istotnym źródłem ciepła były opalane tymi samymi paliwami kotły, które w łącznej produkcji ciepła miały udział w wysokości 26 ÷ 42%. Pompy ciepła z udziałem na poziomie 1 ÷ 2% stanowiły źródło o marginalnym znaczeniu.

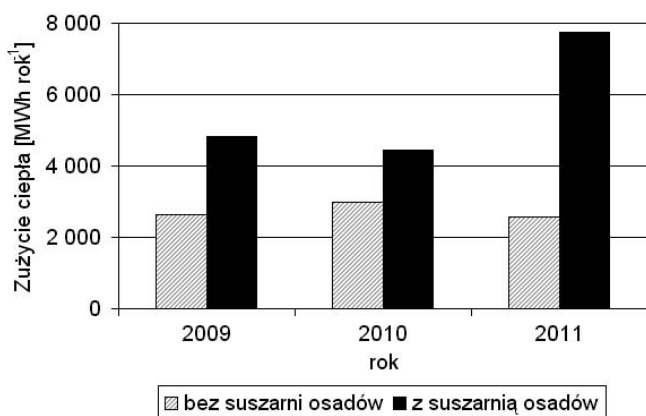
Dla oczyszczalni niewyposażonej w suszarnię bilans ciepła sporządzono na podstawie ciepła wyprodukowanego w ciągu roku przez biogazowe zespoły kogeneracyjne, biogazowe kotły oraz pompy ciepła pobierające ciepło ze ścieków oczyszczonych. W bilansie uwzględniono ciepło użyteczne, rozumiane jako ciepło wykorzystane do ogrzania osadów w komorach fermentacyjnych i ogrzewania budynków, z pominięciem ciepła nadmiarowego, które w układzie bez suszarni byłoby rozproszone do otoczenia. W strukturze bilansu (rys. 6) dominują biogazowe źródła skojarzone, pokrywające 79 ÷ 93% sumarycznej ilości ciepła zużywanej w oczyszczalni. Udział kotłów biogazowych kształtuje się na poziomie 4 ÷ 16%, a pomp ciepła wynosi 2 ÷ 4%. W oczyszczalni, w której całkowita ilość przefermentowanych i odwodnionych osadów ściekowych jest zagospodarowywana rolniczo, całkowite zapotrzebowanie na nośniki ciepła może być pokrywane z odnawialnych i odpadowych zasobów wewnętrznych, takich jak biogaz i ścieki.



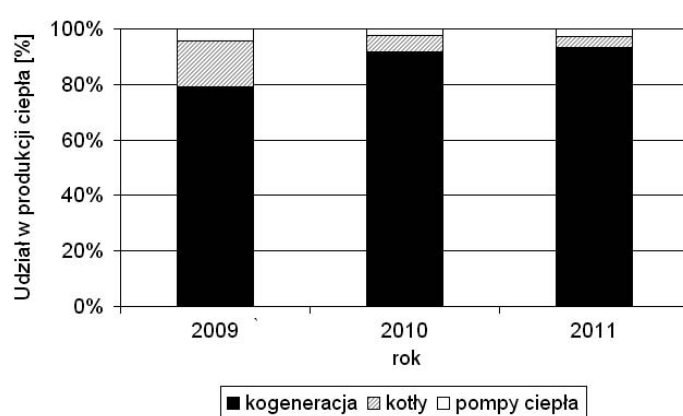
Rys. 3. Struktura zaopatrzenia w energię elektryczną oczyszczalni ścieków bez suszarni osadów



Rys. 5. Struktura zaopatrzenia w ciepło oczyszczalni ścieków z suszarnią osadów



Rys. 4. Roczne zużycie ciepła w oczyszczalni ścieków bez suszarni i z suszarnią osadów



Rys. 6. Struktura zaopatrzenia w ciepło oczyszczalni ścieków bez suszarni osadów

PODSUMOWANIE

Zapotrzebowanie oczyszczalni ścieków na nośniki energii zależy od zastosowanej technologii oczyszczania ścieków i zagospodarowania osadów ściekowych. Wskaźniki energochłonności i ciepłochłonności oczyszczalni nie mogą być jedynym źródłem oceny efektywności energetycznej obiektu. Wysoka energochłonność może być wynikiem zastosowania zaawansowanych technologii oczyszczania ścieków i unieszkodliwiania osadów ściekowych. Wykazano, jak zmiana sposobu zagospodarowania osadów wpływa na zmianę bilansu energii, zarówno pod względem jego wielkości, jak i struktury.

Omawiana oczyszczalnia mechaniczno-biologiczna stanowi przykład obiektu średniej wielkości, prowadzącego stabilizację osadów ściekowych w wydzielonych komorach fermentacyjnych. W rozważanym okresie energochłonność oczyszczalni pozbawionej suszarni osadów wynosiła $0,42 \div 0,47 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$ ścieków, jednostkowe zapotrzebowanie na ciepło było niewiele niższe i kształtowało się na poziomie $0,37 \div 0,42 \text{ kWh}/\text{m}^3$.

Wprowadzenie technologii suszenia jako procesu poprzedzającego spalanie jest zgodne z ideą ostatecznego zagospodarowania osadów ściekowych, ale powoduje znaczący wzrost zapotrzebowania na nośniki energii. W okresie pracy suszarni zapotrzebowanie oczyszczalni na energię elektryczną osiągnęło wartość $0,51 \div 0,56 \text{ kWh}_e/\text{m}^3$ (wzrost o $8 \div 34\%$). W przypadku nośników ciepła wzrost zapotrzebowania był szczególnie wysoki i wynosił $50 \div 201\%$ względem pozostałych odbiorników zainstalowanych w obiekcie. Jednostkowe zapotrzebowanie na energię cieplną oczyszczalni wyposażonej w suszarnię zawierało się w przedziale $0,63 \div 1,11 \text{ kWh}/\text{m}^3$, a zatem było nawet dwukrotnie wyższe niż zapotrzebowanie oczyszczalni na energię elektryczną.

Zmiany w strukturze bilansu energii elektrycznej i ciepła oczyszczalni bez suszarni i z suszarnią osadów wiążą się z wzrostem zapotrzebowania na nośniki oraz rozbudową źródeł energii. Do zespołów kogeneracyjnych i kotłów zasilanych biogazem oraz pomp ciepła dołączyły urządzenia zasilane gazem ziemnym. W obu układach technologii osadowej dominującym źródłem energii elektrycznej były układy skojarzone. Przewaga układu z jednostkami na gaz ziemny polega na ich potencjalnej możliwości całkowitego wyeliminowania zakupu energii elektrycznej z sieci zewnętrznej; w rozważanych warunkach zakup zredukowano do 16%. W przypadku energii cieplnej oczysz-

czalnia bez suszarni mogła funkcjonować wyłącznie w oparciu o wewnętrzne zasoby biogazu i ciepła odpadowego ścieków, z wyraźną dominacją kogeneracji mogącej zaspokoić do 93% rocznego zapotrzebowania na ciepło. W oczyszczalni z suszarnią ciepło skojarzone wytwarzane w urządzeniach biogazowych i gazowych nadal zapewniało pokrycie do 72% rocznego zapotrzebowania, a pozostałą część ciepła dostarczyły kotły. Do suszarni można było skierować nadmiarową energię cieplną wytworzoną z biogazu. We wszystkich konfiguracjach pompy ciepła miały znaczenie drugorzędne.

Objaśnienia

t.s.m. – ton suchej masy

RLM – równoważnik liczby mieszkańców, ładunek zanieczyszczeń odpowiadający jednemu mieszkańcowi

LITERATURA

1. Bień J. B., Wystalska K.: Przekształcanie osadów ściekowych w procesach termicznych. Wyd. Siedel-Przywecki, Warszawa 2009.
2. Descoins N., Deleris S., Lestienne R., Trouvé E., Maréchal F.: Energy efficiency in waste water treatments plants: Optimization of activated sludge process coupled with anaerobic digestion. *Energy* 2012, 41, 153-164.
3. Flores-Alsina X., Corominas L., Snip L., Vanrolleghem P. A.: Including greenhouse gas emissions during benchmarking of wastewater treatment plant control strategies. *Water Research* 2011, 45, 4700-4710.
4. Fytli D., Zabaniotou A.: Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008, 12, 116-140.
5. Hernández-Sancho F., Molinos-Senante M., Sala-Garrido R.: Energy efficiency in Spanish wastewater treatment plants: A non radial DEA approach. *Science of the Total Environment* 2011, 409, 2693-2699.
6. Horttanainen M., Kaikko J., Bergman R., Pasila-Lehtinen M., Nerg J.: Performance analysis of power generating sludge combustion plant and comparison against other sludge treatment technologies. *Applied Thermal Engineering* 2010, 30, 110-118.
7. Ochrona Środowiska 2011. Główny Urząd Statystyczny. Informacje i opracowania statystyczne. Warszawa 2011.
8. Podedworna J., Umiejewska K.: Technologia osadów ściekowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
9. Uchwała nr 217 Rady Ministrów z dn. 24.12.2010 r. w sprawie „Krajowego planu gospodarki odpadami 2014”. *Monitor Polski* nr 101, poz. 1183.