

Zagospodarowanie osadów ściekowych

Sewage sludge management

Michał Wojtasik

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Osady ściekowe to produkt uboczny oczyszczania ścieków. Ten stały produkt powstaje zarówno przy obróbce ścieków komunalnych, jak i przemysłowych. Jest to materiał problematyczny, jednak cieszący się coraz większym zainteresowaniem, między innymi ze względu na jego potencjał energetyczny oraz odpadowe pochodzenie. Każde wykorzystanie osadów ściekowych wpisuje się w gospodarkę o obiegu zamkniętym, więc przewiduje się, że w najbliższych latach będzie to produkt poszukiwany na rynku. Osady ściekowe stanowią odpad o bardzo złożonym i zmiennym składzie, zależnym od miejsca wytworzenia i zastosowanej technologii oczyszczania ścieków – wykazano nawet pewne zmienności jego składu zależne od czasu (pory roku) ich pozyskania. W składzie osadów ściekowych znajdują się może wiele niebezpiecznych substancji, takich jak metale ciężkie, dlatego przed składowaniem lub ponownym wykorzystaniem materiał ten musi zostać przetworzony lub zmodyfikowany. Z drugiej strony osady ściekowe charakteryzują się stosunkowo wysoką wartością opałową, co powoduje, że stają się one coraz bardziej interesującym materiałem energetycznym o niskim śladzie węglowym (odpad). Przeszkodą w bezpośrednim jego zastosowaniu jako paliwa jest wysoka zawartość związków nieorganicznych, co przyczynia się do powstawania dużych ilości popiołów pochodzących z ich spalania. W niniejszej pracy przedstawiono ogólną charakterystykę osadów ściekowych powstających w procesie oczyszczania zarówno ścieków komunalnych, jak i przemysłowych. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań fizykochemicznych osadów ściekowych pozyskanych z regionalnej instalacji przetwarzania odpadów komunalnych (RIPOK). Omówiono zmienność niektórych parametrów fizykochemicznych. Przedstawiono wybrane, perspektywiczne metody zagospodarowania osadów ściekowych, w tym zastosowanie ich w rolnictwie, kompostowanie, fermentację oraz termiczne przekształcanie. Szczególną uwagę zwrócono na metodę pirolizy, czyli beztlenowego przetwarzania osadów w kierunku otrzymania biowęglu, czyli produktu o dużej wartości. Opisano kierunki wykorzystania biowęglu otrzymanego z osadów ściekowych. Na zakończenie artykułu odniesiono się do aktualnej struktury zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, biowęgiel, absorbenty, katalizatory.

ABSTRACT: Sewage sludge is a by-product of sewage treatment. This solid product is generated during the treatment of both municipal and industrial wastewater. Although it is a problematic material, it is becoming increasingly popular, partly because of its energy potential and waste origin. Any use of sewage sludge is considered part of the circular economy, and therefore it is expected that the demand for this product will grow in the coming years. Sewage sludge is a waste with a very complex and variable composition, which depends on factors such as its place of production, the sewage treatment technology used; also, some variability of its composition has been shown to depend on the time (season) of its collection. The sludge may contain many hazardous substances, such as heavy metals, which necessitates processing or modification before storage or reuse. On the other hand, sewage sludge is characterized by a relatively high calorific value, which makes it an increasingly interesting energy material with a low carbon footprint (waste). However, its high content of inorganic compounds leads to significant ash production upon their combustion, which hinders its direct use as fuel. This paper presents the general characteristics of sewage sludge produced during the treatment of both municipal and industrial sewage. Examples of physicochemical test results for sewage sludge obtained from the Regional Municipal Waste Processing Installation (RIPOK) are provided, and the variability of selected physicochemical parameters is discussed. Selected prospective methods of sewage sludge management are also presented, including its use in agriculture, composting, fermentation, and thermal transformation. Particular attention is given to the pyrolysis method, i.e. anaerobic processing of sludge to obtain biochar, a valuable product. Various uses of biochars derived from sewage sludge are described. At the end of the article, the current structure of sewage sludge management in Poland is presented.

Key words: waste sludge, biochar, absorbent, catalyst.

Wstęp

Zgodnie z definicją zawartą w art. 3 ustawy o odpadach (Ustawa, 2012) przez komunalne osady ściekowe rozumie się pochodzący z oczyszczalni ścieków osad z komór fermentacyjnych oraz innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych. Jest to więc materiał odpadowy pozostały po procesie oczyszczania ścieków, zarówno tych miejskich, jak i przemysłowych. Sposób postępowania z osadami ściekowymi uzależniony jest od przyjętej w danej oczyszczalni technologii. Przykładowy schemat gospodarowania odpadami podaje Kempa (1995) (rysunek 1).

Ogólnie postępowanie zawsze obejmuje takie działania jak: odwadnianie, dezynfekcja, zapobiegająca skażeniu biologicznemu, i stabilizacja. Dzięki tym operacjom osady ściekowe nadają się do dalszego przetworzenia. Ze względu na różne technologie wstępnego przetwarzania osadów ściekowych ich skład jest mocno uzależniony od miejsca przetwarzania.

Skład osadów ściekowych

W składzie osadów ściekowych zawsze znajdują się liczne składniki organiczne oraz nieorganiczne. Ilość substancji organicznej w suchej masie w osadach odwodnionych wynosi ponad 50%, natomiast zawartość nieorganicznych związków, stanowiących balast, wynosi około 30–40%. Przykładowy skład osadów ściekowych przedstawiono w tabeli 1. Zbadane osady ściekowe pozyskane zostały przez autora z RIPOK (regionalnej instalacji przetwarzania odpadów komunalnych).

Badane osady ściekowe charakteryzowała stosunkowo wysoka zawartość węgla (60%), co korzystnie wpłynęło na ich wartość opałową (12 MJ/kg). Osady zawierały 35% popiołu,

którego prawdopodobnie głównym składnikiem była krzemionka. Materiał zawierał również 0,15% siarki i 0,5 mg/kg rtęci.

Według Gao et al. (2017) zawartość poszczególnych pierwiastków w osadach ściekowych podlega dużej zmienności, którą zaprezentowano na rysunku 2a, podobnie duże różnice obserwowane są w zawartości poszczególnych pierwiastków w popiele otrzymanym po spaleniu osadów ściekowych (rysunek 2b).

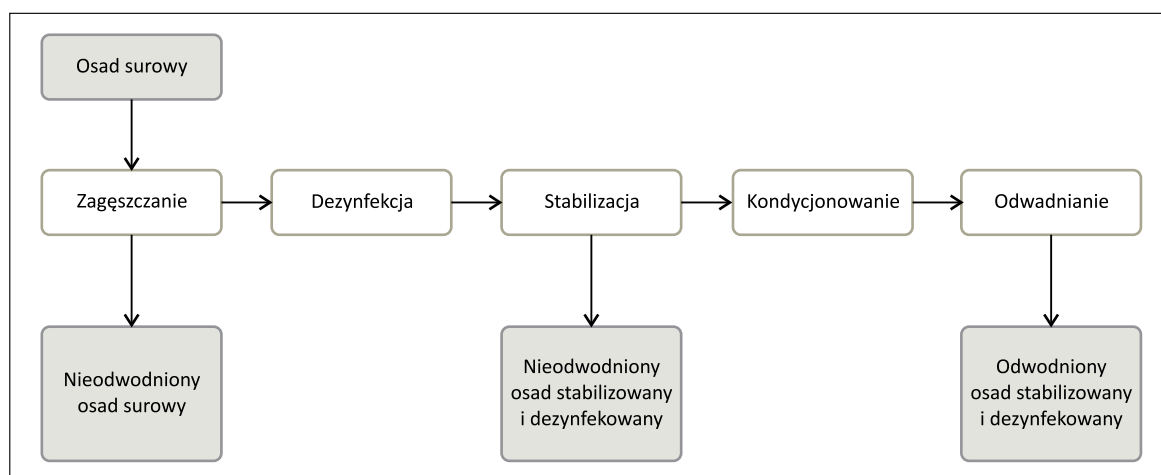
Zagospodarowanie osadów ściekowych

Osady ściekowe mogą być ponownie zagospodarowane pod warunkiem ich ustabilizowania oraz przygotowania, odpowiedniego do celu i sposobu ich wykorzystania. W szczególności osady poddawane są obróbce biologicznej, chemicznej, termicznej lub innemu procesowi, który obniża ich podatność na korozję biologiczną i eliminuje zagrożenie dla środowiska i zdrowia ludzi. Konieczne jest takie przygotowanie osadu ściekowego, aby był on jak najmniej uciążliwy zapachowo, zwłaszcza jeżeli jest stosowany w okresie letnim.

Wykorzystanie w rolnictwie

W Polsce zapis art. 96 (rozdział 4) ustawy o odpadach (Ustawa, 2012) definiuje stosowanie komunalnych osadów ściekowych jako rozprowadzanie na powierzchni ziemi lub wprowadzanie ich do gleby. W artykule tym zostały określone ogólne warunki stosowania komunalnych osadów ściekowych. Komunalne osady ściekowe mogą być poddawane procesowi odzysku polegającemu na ich stosowaniu:

- w rolnictwie, rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, włączając w to uprawy przeznaczone do produkcji pasz;
- do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu;

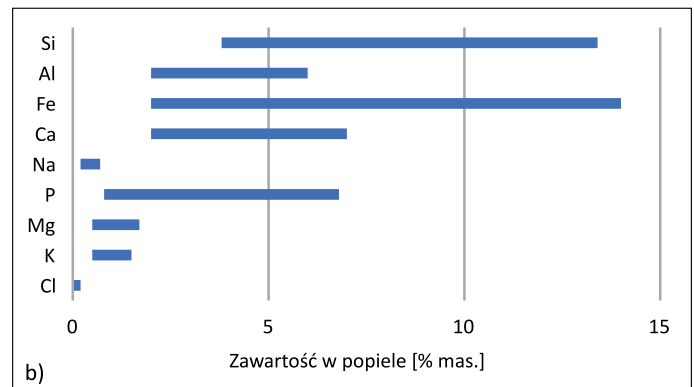
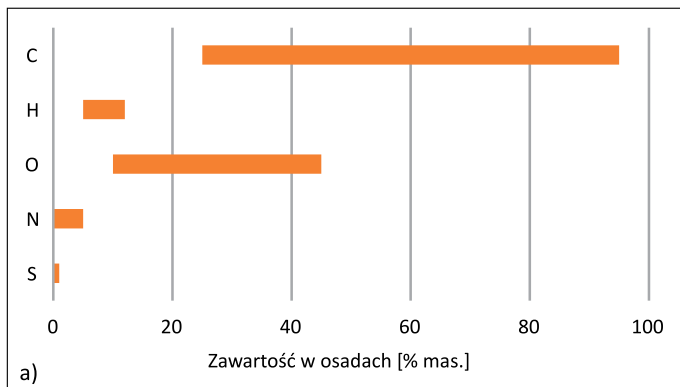


Rysunek 1. Schemat gospodarki osadowej według Kempy (1995)

Figure 1. Scheme of sludge management according to Kempa (1995)

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne osadów ściekowych pozyskanych z RIPOK
Table 1. Physicochemical properties of sewage sludge obtained from RIPOK

Nazwa oznaczenia	Jednostka	Wartość ± niepewność pomiaru
Zawartość wilgoci w próbce analitycznej według PN-EN 15414-3:2011	[% mas.]	10,90 ± 0,60
Zawartość popiołu według PN-EN 15403:2011	[% mas.]	35,10 ± 1,50
Zawartość siarki całkowitej według PN-EN 15408:2011	[% mas.]	0,15 ± 0,01
Ciepło spalania według PN-EN 15400:2011	[kJ/kg]	13211 ± 211
Wartość opałowa według PN-EN 15400:2011	[kJ/kg]	12068 ± 253
Zawartość chloru według metodyki własnej laboratorium wykonującego	[% mas.]	0,08 ± 0,03
Zawartość węgla pierwiastkowego według PN-EN-15407:2011	[% mas.]	60,40 ± 3,00
Zawartość wodoru według PN-EN-15407:2011	[% mas.]	4,08 ± 0,31
Zawartość azotu według PN-EN-15407:2011	[% mas.]	5,64 ± 0,41
Zawartość rtęci według metodyki własnej autora wykonującego	[mg/kg]	0,516 ± 160
Zawartość fluoru według PN-EN 15408:2011	[% mas.]	0,010 ± 0,008
Zawartość krzemionki (SiO ₂) według PN-EN ISO 16967	[% mas.]	10,20 ± 1,50



Rysunek 2. Zmienność zawartości C, H, O, N i S w osadach ściekowych (a) oraz pierwiastków w popiele uzyskanym ze spalania osadów ściekowych (b) (Gao et al., 2017)

Figure 2. Variability of C, H, O, N and S content in sewage sludge (a) and elements in the ash obtained from the combustion of sewage sludge (b) (Gao et al., 2017)

- do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz;
- do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne;
- przy dostosowaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu.

Ustawa (2012) nakłada szereg dodatkowych obowiązków, które muszą być spełnione, by można było stosować osady komunalne w powyższych przytoczonych sytuacjach. Dodatkowo w art. 96 ust. 12 ustawy o odpadach (Ustawa, 2012) określono wyłączenia w stosowaniu osadów ściekowych na cele rolnicze. Materiałów tych nie można stosować:

- na obszarach parków narodowych i rezerwatów przyrody;
- na terenach ochrony pośredniej stref ochronnych ujęć wody, w przypadku ich ustanowienia w akcie prawa miejscowego wydanym na podstawie art. 135 ust. 1 pkt. 2 ustawy – Prawo wodne (Ustawa, 2017);

- w pasie gruntu o szerokości 50 m bezpośrednio przylegającego do brzegów jezior i cieków;
- na obszarach szczególnego zagrożenia powodzią oraz na terenach czasowo podtopionych i bagiennych;
- na terenach czasowo zamarzniętych i pokrytych śniegiem;
- na gruntach o dużej przepuszczalności, stanowiących w szczególności piaski luźne i słabogliniaste oraz piaski gliniaste lekkie, jeżeli poziom wód gruntowych znajduje się na głębokości mniejszej niż 1,5 m poniżej powierzchni gruntu;
- na gruntach rolnych o spadku przekraczającym 10%;
- na obszarach ochronnych zbiorników wód śródlądowych, w przypadku ich ustanowienia w akcie prawa miejscowego wydanym na podstawie art. 141 ust. 1 ustawy – Prawo wodne (Ustawa, 2017);
- na terenach objętych pozostałymi formami ochrony przyrody niewymienionymi w pkt 1, jeżeli osady ściekowe zostały wytworzone poza tymi terenami;

Tabela 2. Maksymalne stężenia dla poszczególnych pierwiastków określone w rozporządzeniu (Rozporządzenie, 2015)**Table 2.** Maximum concentrations for individual elements specified in Regulation (Rozporządzenie, 2015)

Metale	Zawartość metali ciężkich w mg/kg suchej masy osadów nie większa niż przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych		
	w rolnictwie oraz rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	przy dostosowywaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz
Cynk (Zn)	2500	3500	5000
Ołów (Pb)	750	1000	1500
Kadm (Cd)	20	25	50
Chrom (Cr)	500	1000	2500
Miedź (Cu)	1000	1200	2000
Nikiel (Ni)	300	400	500

- na terenach położonych w odległości mniejszej niż 100 m od ujęcia wody, domu mieszkalnego lub zakładu produkcji żywności;
- na gruntach, na których rosną rośliny sadownicze i warzywa, z wyjątkiem drzew owocowych;
- na gruntach przeznaczonych pod uprawę roślin jagodowych i warzyw, których części jadalne bezpośrednio stykają się z ziemią i są spożywane w stanie surowym – w ciągu 18 miesięcy poprzedzających zbiory i w czasie zbiorów;
- na gruntach wykorzystywanych na pastwiska i łąki;
- na gruntach wykorzystywanych do upraw pod osłonami.

Wprowadzanie do gleby komunalnych osadów ściekowych wiąże się również z ograniczeniami związanymi z zawartością niektórych metali zarówno w samych osadach ściekowych, jak i w glebie. Możliwe do zastosowania osady ściekowe powinny spełniać standardy określone w załączniku 1 do rozporządzenia Ministra Środowiska (Rozporządzenie, 2015) w sprawie sposobu prowadzenia oceny zanieczyszczenia powierzchni ziemi. Maksymalne stężenia dla poszczególnych pierwiastków określone w załączniku 1 (Rozporządzenie, 2015) zamieszczono w tabeli 2.

Spalanie osadów ściekowych

Inną metodą odzysku energetycznego z osadów ściekowych jest ich spalanie w energetyce zawodowej oraz zakładach termicznego przetwarzania odpadów lub współspalanie w urządzeniach przemysłowych, np. kotłach lub piecach obrotowych (Wilk i Wolańczyk, 2008). Spalanie wymaga wcześniejszego przygotowania polegającego na usunięciu wody do poziomu <20%. Osady ściekowe poddawane spalaniu muszą również charakteryzować się wartością opałową powyżej 6,5 MJ/kg (Duczowska-Kądział et al., 2014).

Innym sposobem odzysku energetycznego z osadów ściekowych jest spalanie w cementowym piecu obrotowym (Środa

i Kijo-Kleczkowska, 2013). Wysokie temperatury strumienia gazów (>2000°C) powodują prawie całkowity rozkład oraz spalenie organicznych substancji palnych wprowadzonych do pieca. Ważną zaletą cementowego pieca obrotowego w stosunku do spalarni osadów lub innego urządzenia jest bezodpadowa utylizacja. Powstający produkt spalania – popiół jest całkowicie zaabsorbowany i trwale związany w klinkierze, nie stwarzając zagrożenia dla środowiska (Środa i Kijo-Kleczkowska, 2013).

Kompostowanie i fermentacja

Proces kompostowania polega na częściowym rozkładzie niestabilnych substancji w warunkach tlenowych. Proces ten przebiega najczęściej pod wpływem bakterii i grzybów. W trakcie wydzielana jest woda i ditlenek węgla, a produktem finalnym kompostowania jest stosunkowo stabilna pozostałość – określana mianem próchnicy, która jest wartościowym nawozem organicznym. Aby proces kompostowania przebiegał w sposób kontrolowany, osady ściekowe zazwyczaj mieszane są ze słomą lub trocinami w proporcjach objętościowych około 1:3 (Jędrzak, 2001). Domieszka biomasy zwiększa udział węgla w mieszance oraz powoduje wzrost porowatości mieszanki kompostowej. Kompostowanie można prowadzić w pryzmach, wtedy proces trwa około 6 tygodni, lub też w zamkniętych bioreaktorach, przy zwiększonym napowietrzaniu, wówczas trwa około 3 tygodni (Jędrzak, 2001).

Fermentacja metanowa przebiega beztlenowo i jest prowadzona przez bakterie. W pierwszej fazie fermentacji następuje hydroliza i upłynnienie nierozpuszczalnych związków organicznych oraz degradacja wytworzonych związków pośrednich przez bakterie saprofityczne do niższych kwasów tłuszczowych i związków pośrednich. Faza ta nazywana jest fazą kwasową. W drugiej zaś fazie, nazywanej metanową, wytworzone substancje są dalej rozkładane przez bakterie metanowe do

produktów gazowych, głównie metanu i ditlenku węgla. Istotą fermentacji metanowej jest biologiczny rozpad zanieczyszczeń organicznych pod wpływem bakterii anaerobowych. Końcowymi produktami reakcji rozkładu są biogaz i biomasa. Aby proces fermentacji mógł przebiegać prawidłowo, niezbędne jest dotrzymanie odpowiednich warunków reakcji, czyli takich jak pH i temperatura.

Fermentacje prowadzi się w osadnikach gnilnych, osadnikach Imhoffa lub w komorach fermentacyjnych, samodzielnie lub wspólnie z innymi odpadami (kofermentacja) (Gazda et al., 2012).

Otrzymywanie biowęgla

Jednym ze sposobów otrzymywania biowęgla jest piroliza osadów ściekowych, czyli termiczny rozkład bez dostępu powietrza. Produktami pirolizy osadów ściekowych oprócz biowęgla są: gaz składający się głównie z lekkich węglowodorów i wodoru oraz ciecz będąca mieszaniną węglowodorów oraz fazy wodnej. W typowej metodzie pirolizy rozkład termiczny prowadzi się w piecu przy określonej szybkości ogrzewania i temperaturze końcowej w strumieniu azotu lub argonu. Powstały po pirolizie biowęgiel jest zazwyczaj płukany roztworem kwasu solnego w celu zmniejszenia zawartości substancji nieorganicznych na powierzchni (Bedia et al., 2017). Działanie to poprawia również porowatość oraz powierzchnię właściwą biowęgla (Tu et al., 2014; Bedia et al., 2017). Fang et al. (2016) udowodnili, że temperatura rozkładu osadów ściekowych ma istotny wpływ nie tylko na uzysk frakcji stałej, ale przede wszystkim na właściwości morfologiczne i fizykochemiczne powstającego biowęgla. Temperatury pirolizy wynoszące poniżej 500°C powodują dużą zawartość niezwęglonej masy, natomiast piroliza w wyższych temperaturach sprawia, że otrzymany materiał charakteryzuje się dużą liczbą pęknięć i porowatością powierzchni w wyniku uwolnienia substancji lotnych (Huang et al., 2017) Jednakże ogrzewanie powyżej

800°C może w rezultacie zmniejszyć powierzchnię deformacji porów (Gu et al., 2012).

Inną metodą otrzymywania biowęgla jest karbonizacja hydrotermalna (HTC). Proces prowadzi się w autoklawie w temperaturze 150–250°C, w czasie 1–24 godz., pod ciśnieniem 1–1,5 Ba. Ogromną zaletą tej metody jest możliwość jednoczesnej karbonizacji i syntezy z innymi materiałami, czego efektem są modyfikowane biowęgle. Przykładowo Yuan et al. (2014), stosując tę metodę, otrzymywali materiał hybrydowy zawierający biowęgiel i tlenek tytanu TiO₂ o wyjątkowych właściwościach katalitycznych. Podobny materiał otrzymali Zhang et al. (2018) z tą różnicą, że biowęgiel był modyfikowany tlenkiem żelaza. Biowęgiel, ze względu na stabilny skład stałego produktu pirolizy oraz jego wysoką porowatość, wykorzystuje się jako adsorbent do adsorbowania związków metaloorganicznych lub metali ciężkich (Tu et al., 2014; Fang et al., 2016). Ponadto wysoka zawartość metali ciężkich sprawia, że może być on stosowany jako katalizator lub nośnik katalizatorów. W tabeli 3 zaprezentowano kilka adsorbentów otrzymanych z osadów ściekowych, a w tabeli 4 – katalizatory opisane w literaturze.

Tabela 4. Wykorzystanie biowęgla otrzymanych z osadów ściekowych jako nośników katalizatorów

Table 4. Use of biochars obtained from sewage sludge as catalyst supports

Faza aktywna	Odnośnik
Fe ₂ O ₃	(Matos et al., 2011)
Ti ³⁺ /Fe	(Mian i Liu, 2018)
Fe	(Marques et al., 2011)
TiO ₂	(Yuan et al., 2014)
ZnO/Fe ₃ O ₄	(Gu et al., 2012)
Fe ₃ O ₄	(Gu et al., 2012)
	(Zhang et al., 2018)
	(Wang et al., 2017)

Tabela 3. Wykorzystanie biowęgla otrzymanych z osadów ściekowych jako adsorbentów zanieczyszczeń

Table 3. Use of biochars obtained from sewage sludge as pollutant adsorbents

Typ biowęgla	Zanieczyszczenie	Medium oczyszczane	Odnośnik	
niemodyfikowany	bisfenol A	woda	(Huang et al., 2017)	
	fenol		(Huang et al., 2017) (Julcour et al., 2010) (Marques et al., 2011)	
modyfikowany TiO ₂	błękit metylenowy		(Zhang et al., 2017)	
			(Matos et al., 2011)	
modyfikowany TiO ₂ /Fe	p-nitrofenol		(Mian et al., 2019)	
modyfikowany Fe			(Huang et al., 2017)	
modyfikowany Mn	kwas szczawiowy		(Huang et al., 2018)	
modyfikowany Mn/Fe	oranż G		(Li et al., 2017)	
modyfikowany Cu	merkaptan metylowy		powietrze	(He et al., 2020)

Struktura zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce

W Polsce w 2021 r. w oczyszczalniach ścieków przemysłowych i komunalnych wytworzono 1025,8 tys. ton suchej masy osadów ściekowych, tj. o 3,7% więcej niż w 2020 r. (GUS, 2022). Struktura ich zagospodarowania była różna ze względu na ich pochodzenie.

W 2021 r. ilość osadów ściekowych powstających w przemysłowych oczyszczalniach ścieków zmniejszyła się o 37% w stosunku do 2000 r. (z 703,3 tys. ton suchej masy w 2000 r. do 441,0 tys. ton suchej masy w 2021 r.). Jedną z przyczyn powyższego może być zmniejszenie liczby oczyszczalni przemysłowych oraz ilości wytwarzanych ścieków przemysłowych. Na rysunku 3 zaprezentowano kierunki zagospodarowania osadów ściekowych pochodzących z przemysłowych oczyszczalni ścieków w 2021 r. (GUS, 2022).

Zaobserwowano także pozytywny trend w postępowaniu z przemysłowymi osadami ściekowymi, tj. wzrost ilości

osadów poddanych utylizacji termicznej. W 2000 r. metodom przekształcenia termicznego poddano 28,2 tys. ton osadów w przeliczeniu na suchą masę, a w 2021 r. masa osadów przekształconych termicznie była ponad 4-krotnie większa i wyniosła 128,3 tys. ton suchej masy (GUS, 2022).

W przypadku osadów ściekowych powstających w komunalnych oczyszczalniach ścieków sposób postępowania przedstawiono na rysunku 4.

Od 2000 r. do 2021 r. ilość osadów ściekowych wytworzonych w komunalnych oczyszczalniach ścieków wzrosła o około 63%. Podobnie jak w przypadku osadów z przemysłowych oczyszczalni pozytywnym trendem jest wzrost udziału termicznej utylizacji osadów. Obecnie przekształca się ich w ten sposób 5-krotnie więcej niż w 2010 r. Wpływa to na sukcesywny spadek ilości osadów składowanych na terenach komunalnych oczyszczalni ścieków (GUS, 2022).

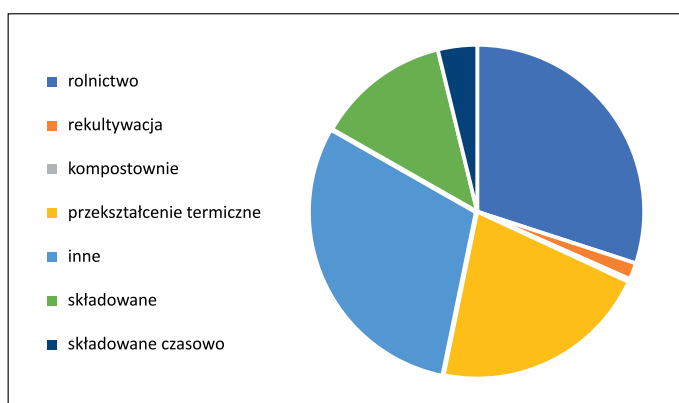
Podsumowanie

Osady ściekowe są odpadem powstającym w procesie oczyszczania ścieków komunalnych lub przemysłowych. Ze względu na ich zróżnicowany skład, zależny od miejsca wytworzenia, metody oczyszczania oraz wiele innych czynników stanowią trudny do zagospodarowania materiał. Głównymi kierunkami utylizacji osadów ściekowych są wykorzystanie ich w rolnictwie w pracach nad rekultywacją oraz ich składowanie. Coraz większa ilość osadów ściekowych jest utylizowana w sposób promowany przez UE, czyli poddawana termicznemu przetworzeniu z odzyskiem energii. Sposób taki powinien być głównym postępowaniem w przypadkach osadów o wartości opałowej wynoszącej powyżej 6 MJ/kg. W literaturze opisywane są dość szeroko nowe możliwości wykorzystania osadów ściekowych, obejmujące zastosowanie ich jako nośników katalizatorów oraz absorbentów zanieczyszczeń. Te funkcje osadów ściekowych są osiągalne po wcześniejszym ich przetworzeniu w biowęgiel, np. na drodze pirolizy.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Poszukiwanie wydajnego katalizatora procesu dekarbonizacji metanu*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0058/TC/2023, nr archiwalny: TC-4101-0041/2023.

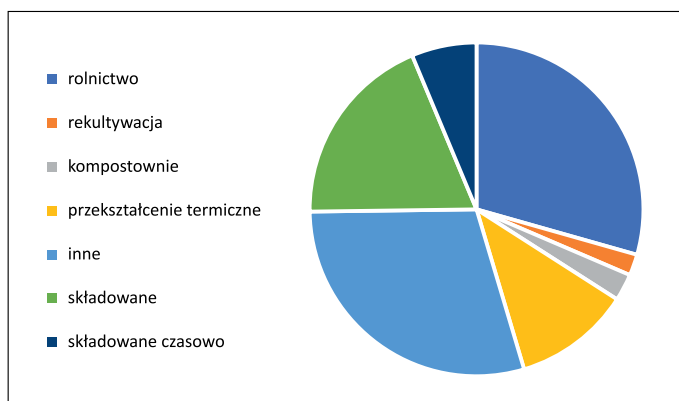
Literatura

- Bedia J., Monsalvo V.M., Rodriguez J.J., Mohedano A.F., 2017. Iron catalysts by chemical activation of sewage sludge with FeCl₃ for CWPO. *Chemical Engineering Journal*, 318: 224–230. DOI: 10.1016/J.CEJ.2016.06.096.
- Duczowska-Kądziel A., Wasilewski M., Duda J., 2014. Możliwości termicznego zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych za pomocą MST w gospodarce paliwowej na przykładzie przemysłu cementowego. *Logistyka*, 6: 3286–3594.



Rysunek 3. Postępowanie z osadami z przemysłowych oczyszczalni ścieków w 2021 r. (GUS, 2022)

Figure 3. Treatment of sludge from industrial sewage treatment plants in 2021 (GUS, 2022)



Rysunek 4. Postępowanie z osadami ściekowymi pochodzącymi z komunalnych oczyszczalni ścieków w 2021 r. (GUS, 2022)

Figure 4. Treatment of sewage sludge generated at municipal sewage treatment plants in 2021 (GUS, 2022)

- Fang S., Tsang D.C.W., Zhou F., Zhang W., Qiu R., 2016. Stabilization of cationic and anionic metal species in contaminated soils using sludge-derived biochar. *Chemosphere*, 149: 263–271. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.060.
- Gao N., Quan C., Liu B., Li Z., Wu C., Li A., 2017. Continuous Pyrolysis of Sewage Sludge in a Screw-Feeding Reactor: Products Characterization and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals. *Energy and Fuels*, 31(5): 5063–5072. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b03112.
- Gazda M., Rak A., Sudak M., 2012. Badania kofermentacji osadów ściekowych z tłuszczami odpadowymi w oczyszczalni ścieków w Brzegu. *Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi*, 3: 79–90.
- Gu L., Zhu N., Zhou P., 2012. Preparation of sludge derived magnetic porous carbon and their application in Fenton-like degradation of 1-diazo-2-naphthol-4-sulfonic acid. *Bioresource Technology*, 118: 638–642. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.102.
- GUS, 2022. Ochrona środowiska 2022, Analizy statystyczne. *Główny Urząd Statystyczny*, ISSN 0867-3217.
- He H., Hu L., Zeng J., Huang Y., He C., Zhang Q., Zhang F., Shu D., 2020. Activation of persulfate by CuO-sludge-derived carbon dispersed on silicon carbide foams for odorous methyl mercaptan elimination: identification of reactive oxygen species. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2): 1224–1233. DOI: 10.1007/s11356-018-3038-3.
- Huang B.C., Jiang J., Huang G.X., Yu H.Q., 2018. Sludge biochar-based catalysts for improved pollutant degradation by activating peroxydisulfate. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(19): 8978–8985. DOI: 10.1039/c8ta02282h.
- Huang H., Yang T., Lai F., Wu G., 2017. Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 125: 61–68. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.04.018.
- Jędrzak A., 2001. Biologiczne przetwarzanie odpadów. *Przegląd Komunalny. Dodatek Gospodarka Odpadami w XXI wieku*, 6: 89–92.
- Julcour L.C., Andriantsiferana C.N., Guessan K., Ayrat C., Mohamed E., Wilhelm A.M., Delmas H., Le Coq L., Gerente C., Smith K.M., Pullket S., Fowler G.D., Graham N.J.D., 2010. Application of sludge-based carbonaceous materials in a hybrid water treatment process based on adsorption and catalytic wet air oxidation. *Journal of Environmental Management*, 91(12): 2432–2439. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.06.008.
- Kempa E., 1995. Problemy przeróbki osadów ściekowych. *Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Gospodarki Osadowej w Oczyszczalni Ścieków”*, Częstochowa.
- Li Y., Yang Z., Zhang H., Tong X., Feng J., 2017. Fabrication of sewage sludge-derived magnetic nanocomposites as heterogeneous catalyst for persulfate activation of Orange G degradation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 529: 856–863. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.06.043.
- Marques R.R.N., Stüber F., Smith K.M., Fabregat A., Bengoa C., Font J., Fortuny A., Pullket S., Fowler G.D., Graham N.J.D., 2011. Sewage sludge based catalysts for catalytic wet air oxidation of phenol: Preparation, characterisation and catalytic performance. *Applied Catalysis B: Environmental*, 101(3–4): 306–316. DOI: 10.1016/j.apcatb.2010.09.033.
- Matos J., Rosales M., García A., Nieto-Delgado C., Rangel-Mendez J.R., 2011. Hybrid photoactive materials from municipal sewage sludge for the photocatalytic degradation of methylene blue. *Green Chemistry*, 13(12): 3431–3439. DOI: 10.1039/c1gc15644f.
- Mian M.M., Liu G., 2018. Recent progress in biochar-supported photocatalysts: Synthesis, role of biochar, and applications. *RSC Advances*, 8(26): 14237–14248. DOI: 10.1039/c8ra02258e.
- Mian M.M., Liu G., Yousaf B., Fu B., Ahmed R., Abbas Q., Munir M.A.M., Ruijia L., 2019. One-step synthesis of N-doped metal/biochar composite using NH₃-ambiance pyrolysis for efficient degradation and mineralization of Methylene Blue. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 78: 29–41. DOI: 10.1016/j.jes.2018.06.014.
- Środa K., Kijo-Kleczkowska A., 2013. Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce. *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, 15(2): 33–50.
- Tu Y., Xiong Y., Tian S., Kong L., Descorme C., 2014. Catalytic wet air oxidation of 2-chlorophenol over sewage sludge-derived carbon-based catalysts. *Journal of Hazardous Materials*, 276: 88–96. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.05.024.
- Wang X., Gu L., Zhou P., Zhu N., Li C., Tao H., Wen H., Zhang D., 2017. Pyrolytic temperature dependent conversion of sewage sludge to carbon catalyst and their performance in persulfate degradation of 2-Naphthol. *Chemical Engineering Journal*, 324: 203–215. DOI: 10.1016/j.cej.2017.04.101.
- Wilk J., Wolańczyk F., 2008. Problemy energetycznego wykorzystania odpadów z oczyszczalni ścieków. *Polityka Energetyczna*, 11(2): 139–149.
- Yuan S.J., Li X.W., Dai X.H., 2014. Efficient degradation of organic pollutants with a sewage sludge support and in situ doped TiO₂ under visible light irradiation conditions. *RSC Advances*, 4(105): 61036–61044. DOI: 10.1039/c4ra12434k.
- Zhang H., Xue G., Chen H., Li X., 2018. Magnetic biochar catalyst derived from biological sludge and ferric sludge using hydrothermal carbonization: Preparation, characterization and its circulation in Fenton process for dyeing wastewater treatment. *Chemosphere*, 191: 64–71. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.10.026.
- Zhang W., Huang X., Jia Y., Rees F., Tsang D.C.W., Qiu R., Wang H., 2017. Metal immobilization by sludge-derived biochar: roles of mineral oxides and carbonized organic compartment. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(2): 379–389. DOI: 10.1007/s10653-016-9851-z.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie stosowania komunalnych osadów ściekowych (Dz.U. z 2015 r. poz. 257).
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2023 r. nr 62, poz. 1587).
- Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. – Prawo wodne (Dz.U. z 2017 r. poz. 1566).



Dr Michał WOJTASIK
 Adiunkt w Zakładzie Zrównoważonych Technologii Chemicznych
 Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
 ul. Lubicz 25 A
 31-503 Kraków
 E-mail: michal.wojtasik@inig.pl