

Sylwia Siebielec¹, Magdalena Urbaniak^{2,3}, Grzegorz Siebielec¹

*¹Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

²Europejskie Regionalne Centrum Ekohydrologii Polskiej Akademii Nauk w Łodzi

³Uniwersytet Łódzki

ZANIECZYSZCZENIA I METODY UZDATNIANIA KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH*

Słowa kluczowe: jakość sanitarna, osady ściekowe, pierwiastki śladowe, zanieczyszczenia

Wstęp

Wzrastająca ilość osadów ściekowych będąca wynikiem intensywnego rozwoju gospodarki i procesu urbanizacji stanowi jeden z istotnych problemów ochrony środowiska oraz może prowadzić do zachwiania równowagi ekologiczno-biologicznej w przyrodzie. Głównymi czynnikami odpowiadającymi za rosnący poziom produkcji osadów ściekowych na obszarze Polski są przede wszystkim: modernizacja i budowa nowych oczyszczalni, a także rozbudowa sieci kanalizacyjnych (4, 6).

Z badań monitoringowych na poziomie europejskim wynika, że ilość wytwarzanych osadów ściekowych na terenie Europy w ostatnim dziesięcioleciu stale rosła, a ich suma w latach 2009-2011 wynosiła około 9,7 mln ton suchej masy osadu (tab. 1) (14, 25).

Dane Głównego Urzędu Statystycznego informują, iż ilość komunalnych osadów ściekowych przeliczonych na suchą masę wyprodukowanych w Polsce na koniec 2012 roku wynosiła około 513 tys. ton (rys. 1). Prognozy Krajowego Planu Gospodarki Odpadami z 2014r. mówiły, że liczba ta w roku 2015 miała wzrosnąć do 642,4 tys. ton s.m., a opierając się na założeniach i dalszych prognozach demograficznych szacuje się, że w roku 2018 liczba ta może sięgnąć nawet 706,6 tys. ton s.m. osadu (5, 19, 56).

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.5 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

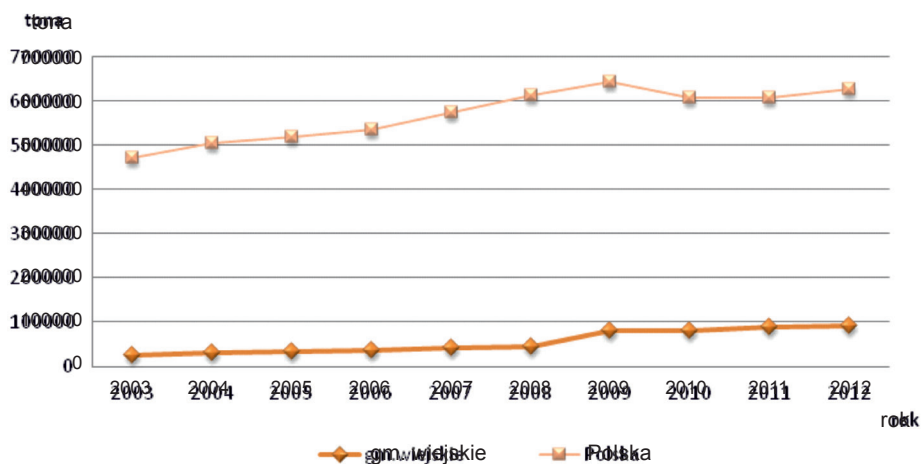
Tabela 1

Osady ściekowe wytwarzane w poszczególnych krajach w wybranych latach (źródło: Eurostat)

Kraj	Rok	Suma (tys. ton)	Kraj	Rok	Suma (tys. ton)
Bułgaria	2011	51,8	Cypr	2010	8,12
Chorwacja	2011	31,04	Dania	2010	141
Republika Czeska	2011	217,89	Francja	2010	966,38
Estonia	2011	18,28	Niemcy	2010	1 779,96
Grecja	2011	146,95	Włochy	2010	1 102,65
Węgry	2011	168,33	Luksemburg	2010	9,74
Irlandia	2011	85,65	Holandia	2010	350,95
Litwa	2011	51,85	Hiszpania	2010	1 205,12
Malta	2011	6,06	Szwecja	2010	203,52
Polska	2011	519,2	Wielka Brytania	2010	1 419,06
Rumunia	2011	114,1	Łotwa	2009	22,37
Słowenia	2011	26,04	Finlandia	2009	149
Słowacja	2011	58,72	Portugalia	2009	344,25
Austria	2010	262,81	Szwajcaria	2009	210
Belgia	2010	176,32	Islandia	2003	1,20
		Razem			
		9 662,81			

Osady ściekowe wykazują dużą zmienność składu chemicznego, zawierają cenne składniki nawozowe takie jak: azot, fosfor, wapń, magnez czy siarkę, niezbędne do prawidłowego wzrostu roślin, a również mające korzystny wpływ na utrzymanie odpowiednich właściwości fizycznych, chemicznych i biologicznych gleby (15, 29, 35, 48, 59). Ponadto w ich skład wchodzi substancje niepożądane, do których należą potencjalnie toksyczne metale śladowe, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenyle (PCB), chlorowcopochodne związki organiczne (AOX) oraz dioksyny, co budzi pewne zastrzeżenia w odniesieniu do możliwości ich rolniczego wykorzystania (40, 48). Oprócz tego osady ściekowe mogą być źródłem mikroorganizmów chorobotwórczych i pasożytów (pałeczki *Salmonella*, *Toxocara spp.*, *Ascaris spp.*), co zależy od charakterystyki systemu kanalizacji oraz sposobu uzdatnienia osadu (21).

Wzrost produkcji osadów ściekowych zwiększa presję związaną z poszukiwaniem najlepszych środowiskowo rozwiązań (27). Istotą zrównoważonego podejścia do problemu osadów ściekowych jest opracowanie metod ich unieszkodliwiania, a także prawidłowej utylizacji osadów oraz ich racjonalne wykorzystanie w rolnictwie wraz z monitoringiem prowadzonym na tych terenach.



Rys. 1. Wielkość produkcji osadów ściekowych w Polsce i na obszarach wiejskich w okresie 2003-2012 (19)

Zanieczyszczenia osadów ściekowych pierwiastkami śladowymi

Ilość pierwiastków występujących naturalnie w przyrodzie jest zależna od składu mineralnego skały macierzystej gleb, a także naturalnych procesów geo- i pedogenicznych, odpowiadających za charakterystykę profilu glebowego. Gleba poprzez uczestnictwo w obiegu pierwiastków biogennych warunkuje ilość i jakość otrzymywanych plonów roślin pod względem zawartości pierwiastków (49, 54). Grupę szczególnie szkodliwych pierwiastków, które cechuje niekorzystny wpływ środowiskowy i zdrowotny stanowią: kadm, rtęć, arsen oraz ołów. Nie stwierdzono roli fizjologicznej tych pierwiastków w organizmach żywych, natomiast należą one do najbardziej toksycznych (46). W pewnych warunkach na rośliny lub organizmy żywe szkodliwie mogą oddziaływać chrom, nikiel, miedź czy cynk. Należy dodać, że metale śladowe występują w pewnych ilościach w glebie nie tylko w miejscach silnie zurbanizowanych, ale także na terenach rolniczych i w siedliskach naturalnych, gdyż są one naturalnymi składnikami gleb (53).

Podwyższone zawartości pierwiastków śladowych w osadach ściekowych pochodzą głównie ze ścieków przemysłu garbarskiego, lakierniczego czy hutniczego. Dodatkowo metale te pochodzą ze ścieków bytowych, spływów powierzchniowych oraz występują w ściekach jako następstwo korozji przewodów (16).

Pierwiastki śladowe obecne w osadach ściekowych występują w nich w różnych postaciach: rozpuszczonej, wytrąconej, współstrąconej z tlenkami metali, zaadsorbowanej lub zasocjowanej na cząstkach resztek biologicznych. Formy chemiczne w jakich występują to przede wszystkim: tlenki, wodorotlenki, siarczki, siarczany,

fosforany, krzemiany czy organiczne połączenia w postaci kompleksów huminowych (1, 8). Forma chemiczna pierwiastków śladowych obecnych w osadach ściekowych, decyduje o ich mobilności i zakresie przenikania z osadów do wód gruntowych lub gromadzenia w roślinach po zastosowaniu osadów do nawożenia gleb (58).

W badaniach *Latosińskiej i Gawdzik* (30) procentowy udział poszczególnych frakcji metali śladowych w osadach ściekowych nie był uwarunkowany sposobem stabilizacji osadów. Uzyskane dane wskazują, iż udział frakcji mobilnych metali w osadach ściekowych jest niewielki. Pewien wyjątek od tej reguły stanowi w niektórych osadach mobilność chromu i kadmu. Stwierdzono, że sumaryczna ilość metali śladowych w osadach ściekowych nie jest tożsama z możliwością ich uwolnienia do środowiska gruntowo-wodnego. Istotą jest forma ich występowania, co udowodniono przez analizę mobilności metali. Autorzy wnioskują, że uwzględnienie frakcji metali ciężkich w normatywach regulujących przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych pozwoliłoby wykorzystać osady ściekowe bardziej efektywnie z punktu widzenia bezpieczeństwa środowiskowego i właściwości nawozowych (30).

Jak wykazały badania *Stuczynskiego i in.* (51), jedynie kadm występuje w osadach w znacznej części w formie wymiennej, podczas gdy takie pierwiastki jak cynk, ołów, nikiel, chrom występują w trudno dostępnych formach tlenkowej, organicznej i rezydualnej. Fakt ten świadczy o ograniczonej dostępności tych metali wprowadzanych do gleby wraz z osadami oraz o sorpcyjnej roli mineralnych i organicznych składników samego osadu.

W badaniach prowadzonych przez *Bauman-Kaszubską i Sikorskiego* (2) osady ściekowe z obszaru powiatu plockiego cechowały się zmiennymi właściwościami chemicznymi oraz fizycznymi. Ich chemiczna charakterystyka wskazywała na stosunkowo niewielkie zawartości pierwiastków potencjalnie szkodliwych (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Zn, Hg) w odniesieniu do dopuszczalnych norm (36) (tab. 2).

Tabela 2

Zawartości pierwiastków śladowych ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.) w osadach ściekowych z oczyszczalni ścieków w powiecie plockim (2)

Pierwiastek	Zawartość		Zawartość dopuszczalna*
	Zakres	Średnia	
Ołów	44 ÷ 500,0	204,5	750
Kadm	0,66 ÷ 9,83	5,48	20
Chrom	0,50 ÷ 23,80	12,08	500
Miedź	48,00 ÷ 145,94	91,63	1000
Nikiel	11,17 ÷ 70,17	30,81	300
Rtęć	0,005 ÷ 0,760	0,133	16
Cynk	772,90 ÷ 1580,00	1150,80	2500

*Dopuszczalne zawartości metali w komunalnych osadach ściekowych stosowanych w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne (36).

Duże zróżnicowanie właściwości chemicznych ukazują również inne badania przeprowadzone na 60 osadach ściekowych pochodzących z komunalnych oczyszczalni ścieków. Wyniki te wskazują, że osady ze Śląska zawierają większe ilości kadmu i ołowiu niż osady z pozostałego obszaru Polski, natomiast nie różnią się istotnie pod względem zawartości pozostałych metali. Normy zawartości pierwiastków śladowych ustalone dla osadów stosowanych w rolnictwie spełniało aż 68% wszystkich przebadanych osadów, natomiast spośród przeanalizowanych metali najwięcej przekroczeń zanotowano w przypadku cynku (48).

Zanieczyszczenia osadów ściekowych związkami organicznymi

Związki organiczne stanowią zróżnicowaną grupę zanieczyszczeń, które w przypadku niewłaściwego stosowania osadów ściekowych w rolnictwie mogą kumulować się w glebie. Niepełna degradacja zanieczyszczeń organicznych w środowisku przyrodniczym stwarza ryzyko działania toksycznego, mutagennego i kancerogenego tych związków. Zdolność niektórych związków do akumulacji w organizmach zwierzęcych, jak również roślinnych, może powodować pośrednie zagrożenie dla zdrowia człowieka. Ponadto zróżnicowanie antropogenicznych i naturalnych źródeł tych związków sprawia, że mogą one oddziaływać na organizmy żywe różnymi drogami narażenia (52).

Najbardziej rozpowszechnionymi oraz objętymi monitoringiem różnych elementów środowiska zanieczyszczeniami organicznymi są: pestycydy (np. aldryna, dieldryna, DDT, HCB, HCH), wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), polichlorowane bifenylole (PCBs) oraz dioksyny (PCDD) (tab. 3) (41).

Wszystkie substancje wymienione w tabeli 3. stanowią potencjalnie zagrożenie dla środowiska przyrodniczego i człowieka, jeśli występują w nadmiernych ilościach, ich obecność w osadach ściekowych jest zatem jednym z potencjalnych niebezpieczeństw związanych ze stosowaniem osadów ściekowych. Dlatego też niektóre kraje Unii Europejskiej wprowadziły normy dotyczące tych zanieczyszczeń organicznych, które charakteryzują się znaczną częstotliwością występowania w osadach ściekowych (41).

Zawartość zanieczyszczeń organicznych w osadach ściekowych w Polsce jest rzadziej oznaczana, gdyż pomiar ten nie jest wymagany dla rolniczego lub rekultywacyjnego stosowania osadów ściekowych (36).

Dostępne badania na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat wskazują, iż osady ściekowe wykazują znaczne zróżnicowanie ilości związków PCDD/PCDF wahające się w granicach 2,26-1270 ng I-TEQ kg⁻¹ w Stanach Zjednoczonych (45), 19-225 ng I-TEQ kg⁻¹ w Wielkiej Brytanii (50), 7-160 ng I-TEQ kg⁻¹ w Hiszpanii (13) oraz pomiędzy 16,85 a 74,56 ng I-TEQ kg⁻¹ w Polsce (9, 39).

Podobnie zawartości sumy WWA w osadach ściekowych wahają się w szerokim przedziale, który dla 5 miast południowo-wschodniej Polski wynosił od 3674,1 do 11236,3 µg/kg (40). Inne badania tego samego autora wykazały wartości sumy WWA

w osadach ściekowych pochodzących z 10 oczyszczalni ścieków położonych w tej części kraju wahające się od 261,6 do 2000,8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (42), a w oczyszczalni ścieków w Zamościu nawet 4700 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (43).

Tabela 3

Krótką charakterystyką zanieczyszczeń organicznych występujących w osadach ściekowych

CHARAKTERYSTYKA ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH

Pestycydy

To substancje należące do grupy związków chemicznych (naturalnych i syntetycznych) wykorzystywanych do zwalczania organizmów szkodliwych dla człowieka, zwierząt i roślin. Z grupy pestycydów chloroorganicznych największy problem stanowią pozostałości DDT i jego metabolity (41).

Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne

Przenikają do środowiska ze źródeł, do których należą m.in.: przemysł hutniczy, przemysł koksowniczy, elektrociepłownie czy transport. Istnieje możliwość zanieczyszczeń glebowych oraz wód powierzchniowych bądź podziemnych tymi substancjami w wyniku przecieków zbiorników ropy naftowej. Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA) w środowisku naturalnym występują przede wszystkim w postaci mieszanin różnych związków. Są wrażliwe na czynniki utleniające, wykazują działanie rakotwórcze i mutagenne, zaliczane są do tzw. trwałych zanieczyszczeń organicznych (TZO) (31, 33, 41).

Polichlorowane bifenyle

Polichlorowane bifenyle charakteryzują się trwałością w dużych temperaturach oraz odpornością na działanie kwasów czy zasad. Procesy, w czasie których przedostają się do środowiska to przede wszystkim przemysłowe chlorowanie, wycieki, spalanie, nielegalne składowiska (41).

Dioksyny

Łączą w sobie dwie klasy związków: polichlorowane dibenzodioksyny (PCDDs)- grupa 65 związków i polichlorowane dibenzofurany (PCDFs)- grupa 135 związków. Emitowane są do środowiska przyrodniczego przede wszystkim w wyniku procesów spalania odpadów, przemysłu chemicznego czy pożarów lasów (41, 55).

Jakość sanitarna osadów ściekowych

Wiele krajów europejskich w wymogach sanitarnych dotyczących osadów ściekowych uwzględnia zazwyczaj grupę mikroorganizmów, natomiast rzadko pojedynczy mikroorganizm. Do najczęściej stosowanych wskaźników jakości sanitarnej należą: ogólna liczba bakterii grupy coli oraz coli typu fekalnego, *Escherichia coli*, *Enterococcus*, *Clostridium* oraz rodzina *Enterobacteriaceae*, a wśród nich *Salmonella* (24). Polskie regulacje biorą pod uwagę obecność bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella* oraz łączną liczbę jaj pasożytów jelitowych (*Ascaris spp.*, *Trichuris spp.*, *Toxocara spp.*) (36).

Naukowe źródła podają, iż najczęściej występujące i oznaczane gatunki bakterii pojawiające się w osadach ściekowych to: *Salmonella typhi*, *Escherichia coli*, *Clostridium botulinum*, *Vibrio Cholerae*, *Mycobacterium Tuberculosis*, *Shigella spp.*, *Pseudomonas aeriginosa* (34). Z badań wynika także, że osady ściekowe stanowią miejsce bytu dla populacji grzybów, takich jak: *Penicillium*, *Verticillum*, *Mucor*, *Mortierella*, *Fuzarium*, *Geotrichum* czy *Trichoderma* (38).

Komunalne osady ściekowe ze względu na swoje właściwości chemiczne i fizyczne, są dobrym substratem do namnażania różnego rodzaju organizmów chorobotwórczych, w tym bakterii, grzybów strzępkowych czy drożdżaków, co w konsekwencji może stanowić pewne zagrożenie dla ekosystemów glebowych, wodnych oraz zdrowia człowieka (24). Stwierdzenie obecności bakterii *Salmonella sp.* w próbkach pochodzących z osadów ściekowych jest dość trudne, ze względu na ich małą liczebność (23). Ponadto nieobecność Pałeczki *Salmonella sp.* nie oznacza, że brak ich wykrycia w danej próbce osadu wyklucza obecności innych organizmów chorobotwórczych (23, 24).

Brak jest badań monitoringowych na poziomie kraju dotyczących jakości sanitarnej osadów ściekowych. Publikowane dotychczas badania skupiają się z reguły na pojedynczych oczyszczalniach ścieków. W badaniach prowadzonych przez B a u m a n - K a s z u b s k ą i S i k o r s k i e g o (2) osady ściekowe powiatu płockiego charakteryzowały się stosunkowo niewielką ilością badanych czynników chorobotwórczych. Oznacza to, iż w warunkach powiatu płockiego istnieją realne możliwości przyrodniczego, w tym rolniczego wykorzystania osadów ściekowych patrząc na sanitarno-epidemiologiczną oraz chemiczną stronę, a także inne badane parametry (zawartości składników nawozowych oraz stosunkowo niewielkie ilości metali śladowych).

Badania dotyczące jakości osadów pochodzących z oczyszczalni ścieków w Suwałkach wykazały niskie zawartości metali ciężkich, natomiast jedną z przeszkód okazała się obecność bakterii jelitowych pałeczek okrężnicy, co powinno wykluczyć ten osad z rolniczego wykorzystania. Na podstawie wymaganych analiz dotyczących jakości sanitarnej osad ten mógł być oceniony jako pełnowartościowy nawóz organiczny (azot, fosfor, mikroelementy, substancja organiczna), jednak dla zapewnienia pełnego bezpieczeństwa powinien być wykorzystywany wyłącznie do rekultywacji terenów przeznaczonych na cele nie rolne, a także pod uprawę roślin nieprzeznaczonych do spożycia np. roślin energetycznych (22). W innych badaniach ocena mikrobiologiczna osadów wykazała występowanie bakterii patogennych i względnie chorobotwórczych w przeanalizowanych próbkach. Autorzy doszli do wniosków, że dłuższe składowanie osadów ściekowych obniża ich skażenie bakteriologiczne, lecz oczywiście nie zapewnia ich pełnej higienizacji (7).

Warunki przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych

Przyrodnicze wykorzystanie (rolnicze i rekultywacyjne) uważane jest za przyszłościową metodę zagospodarowania osadów ściekowych. Z uwagi na obecność

istotnych ilości substancji organicznej, a także składników nawozowych w osadach ściekowych ich zastosowanie do poprawy właściwości gleb jest celowe i ekonomicznie uzasadnione. Jednak pewnym ograniczeniem dla przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych, budzącym sporo kontrowersji, jest obecność w nich wspomnianych wcześniej substancji niepożądanych (niektóre metale śladowe, zanieczyszczenia organiczne) oraz organizmów chorobotwórczych (3).

Podstawowymi aktami prawnymi dotyczącymi postępowania z komunalnymi osadami ściekowymi są: Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2013 r. poz. 21, z późn. zm.) (57) oraz w odniesieniu do ich przyrodniczego wykorzystania Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (36).

Wskaźniki jakościowe jakie muszą spełniać komunalne osady ściekowe dla ich rolniczego wykorzystania określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. Wymogi te zostały ustalone w odniesieniu do takich parametrów, jak zawartość pierwiastków śladowych (kadm, ołów, rtęć, nikiel, cynk, miedź, chrom), obecność bakterii chorobotwórczych (z rodzaju *Salmonella*) oraz łączna liczba jaj pasożytów jelitowych (*Ascaris spp.*, *Trichuris spp.*, *Toxocara spp.*). Ponadto Rozporządzenie wymaga oznaczenia w osadach wilgotności, odczynu, zawartości substancji organicznej, azotu ogólnego, azotu amonowego oraz całkowitej zawartości fosforu, wapnia i magnezu, nie precyzując jednak dla nich liczb granicznych (36). Grunty, na których stosowane będą osady ściekowe muszą być scharakteryzowane pod względem odczynu, zawartości fosforu przyswajalnego oraz zawartości metali śladowych (siedem poprzednio wymienionych pierwiastków). Dopuszczalne zawartości pierwiastków śladowych w komunalnych osadach ściekowych, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 r. dla ich rolniczego i nierolniczego zagospodarowania przedstawiono w tabeli 4 (36).

Tabela 4

Dopuszczalna zawartość metali ciężkich, w $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. w osadach przeznaczonych do rolniczego i nierolniczego wykorzystania, według Rozporządzenia Ministra Środowiska (36)

Sposób wykorzystania komunalnych osadów ściekowych			
Pierwiastek	Użytkowanie rolnicze i rekultywacja gruntów rolniczych	Rekultywacja gruntów nierolniczych	Produkcja kompostu, roślinne utrwalanie gruntów
Kadm	20	25	50
Chrom	500	1000	2500
Nikiel	300	400	500
Miedź	1000	1200	2000
Ołów	750	1000	1500
Cynk	2500	3500	5000
Rtęć	16	20	25

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska (36) maksymalna dawka osadu ściekowego, która może być wykorzystana w rolnictwie na jednostkę gruntu, spełniając przy tym normy dopuszczalnej zawartości metali ciężkich, nie może rocznie przekraczać $3 \text{ ton s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w przypadku zastosowania jednorazowo dawki 3-letniej $9 \text{ ton s.m.} \cdot \text{ha}^{-1}$. Ustawa o odpadach dostosowuje polskie prawo do szeregu szczegółowych aktów prawnych Unii Europejskiej: dyrektywy Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, a szczególnie gleb, przy stosowaniu osadów ściekowych w rolnictwie, dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów, a także dyrektywy Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów. Wspomniana Dyrektywa 86/278/EWG określa warunki, jakie muszą być spełnione przy wykorzystywaniu osadów ściekowych, maksymalne stężenia metali ciężkich w glebie i w osadach oraz dopuszczalną roczną ilość metali ciężkich, jaka może być wprowadzona do gleby, a także nakłada obowiązek poddawania analizie osadów i gruntów, na których mają być stosowane. Należy zwrócić uwagę, że zasady określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 2015 r. (36) eliminują praktycznie ryzyko związane z zanieczyszczeniem gleb pierwiastkami śladowymi ze strony osadów, o ile wspomniane przepisy są przestrzegane. Dla przykładu, maksymalna dopuszczalna ilość kadmu, jaka może trafić z osadem do gleby użytkowanej rolniczo, to $60 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$ (przy założeniu zawartości 20 mg kadmu na kg osadu i dawki $3 \text{ t s.m. osadu} \cdot \text{ha}^{-1}$). Ponieważ mediana zawartości Cd w osadach wynosi niecałe $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, czyli przeciętnie wraz z 3 tonami osadu trafia rocznie do gleby nie więcej niż 15 g Cd na powierzchni 1 hektara (48). Natomiast średnia ilość kadmu w wierzchniej warstwie gleby w Polsce na powierzchni hektara wynosi około 1500 g (obliczenie na podstawie średniej zawartości w glebie wynoszącej około $0,5 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$) (47). Podwojenie średniej zawartości kadmu w glebie nastąpiłoby zatem po około 100 latach corocznego stosowania średniej jakości osadu ściekowego na tej samej glebie. Z drugiej strony, dopuszczalne obecnie dawki osadów, choć skutecznie chronią środowisko, niestety w dużym stopniu ograniczają możliwości wzbogacenia gleby w materię organiczną poprzez zabieg nawożenia osadami.

W myśl dyrektyw unijnych, odpady mogą być składowane na składowisku odpadów innych niż niebezpieczne w przypadku, kiedy zawartość ogólnego węgla organicznego (TOC) nie przekracza $5\% \text{ s.m.}$, straty przy prażeniu nie są większe niż $8\% \text{ s.m.}$, natomiast ciepło spalania nie przekracza $6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$, co praktycznie wyklucza deponowanie osadów ściekowych na składowiskach odpadów (10, 11, 12, 57).

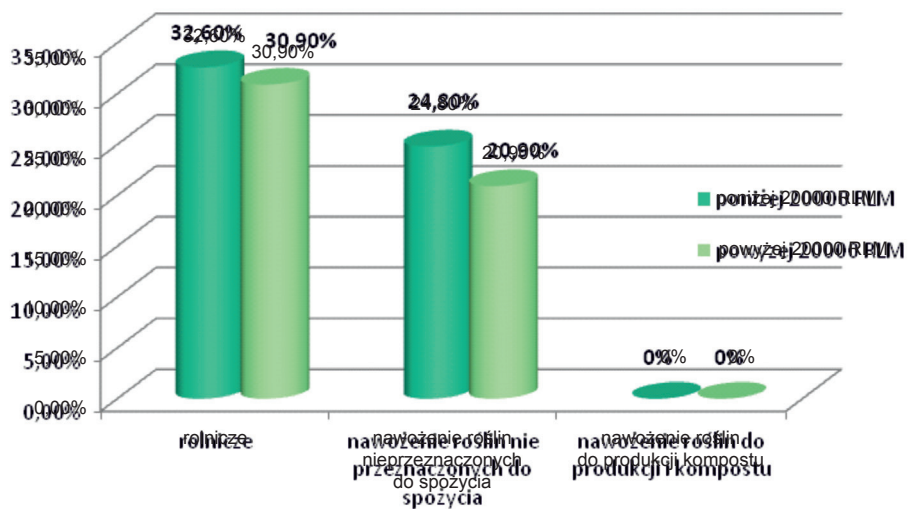
Z danych publikowanych na stronach GUS-u wynika, że udział rolniczego wykorzystania osadów wzrastał w ostatnim dziesięcioleciu i obecnie przekracza 20% (tab. 5). Znaczenie poszczególnych sposobów zagospodarowania osadów powoli się zmienia – dla przykładu wzrasta ilość osadów spalanych a maleje ilość osadów składowanych (18, 19).

Tabela 5

Ilość osadów wytwarzanych w komunalnych oczyszczalniach w Polsce zagospodarowanych różnymi metodami utylizacji (tys. ton) (18, 19)

Sposób zagospodarowania	2004	2008	2011	2014
W rolnictwie	66,9	112,0	116,2	107,2
Do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne	110,7	105,8	54,4	21,9
Do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu	29,7	27,5	31,0	46,3
Przekształcone termicznie	1,4	6,0	41,6	84,2
Składowane	162,7	91,6	51,4	31,5
Magazynowane czasowo i inne sposoby	22,0	52,9	53,1	62,2

Na wykresie 2 przedstawiono procentowy udział osadów ściekowych objętych kontrolą, wykorzystanych w rolnictwie w latach 2011-2012, w zależności od wielkości oczyszczalni (37).



Rys. 2. Udział procentowy sposobów zagospodarowania osadów ściekowych na obszarach objętych kontrolą na przełomie lat 2011-2012 (37)

Unieszkodliwianie pierwiastków śladowych i detoksykacja zanieczyszczeń organicznych w osadach

Zwiększenie ilości komunalnych osadów ściekowych wykorzystywanych w rolnictwie może się wiązać z potrzebą uzdatniania osadów. Dotychczasowa wiedza nabyta w ramach projektów dotyczących remediacji gleb zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi pozwala na dość skuteczny dobór przyrodniczych metod ograniczania negatywnych skutków zanieczyszczenia gleb. Metody te są stosunkowo tanie i polegają zasadniczo na obniżaniu biodostępności pierwiastków śladowych. Potencjalnie techniki te mogą być też zastosowane do uzdatniania osadów ściekowych, przy czym ich skuteczność w tego typu zastosowaniach była zdecydowanie rzadziej weryfikowana (tab. 6).

W odniesieniu do zanieczyszczeń toksycznymi związkami organicznymi w remediacji gleb wykorzystuje się procesy rozkładu zanieczyszczeń z wykorzystaniem roślin i mikroorganizmów. Potencjalne zastosowania tych metod w unieszkodliwianiu zanieczyszczeń organicznych w osadach ściekowych przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 6

Potencjalne przyrodnicze sposoby unieszkodliwiania pierwiastków śladowych w osadach ściekowych (56 z modyfikacjami)

Proces	Opis metody/procesu	Skuteczność metody w stosunku do osadów ściekowych
Fitoulatnianie/ fitowaporacja	Pobieranie przez rośliny z gleby substancji nieorganicznych oraz ich uwalnianie do atmosfery w postaci lotnej	Stosunkowo skuteczne w stosunku do rtęci i selenu; niewiele badań nad skutecznością oczyszczania osadów
Fitoekstrakcja	Wykorzystanie roślin o dużej biomase i odporności na metale, do ich usuwania z gleby. W procesie fitoekstrakcji wykorzystywane są też hiperakumulatory czyli gatunki o naturalnych zdolnościach akumulacji, np. <i>Alyssum murale</i> , <i>Alyssum corsicum</i> , <i>Berkheya codii</i> które akumulują Ni	W glebach skuteczność ograniczona w odniesieniu do całkowitych zawartości metali, natomiast z reguły zmniejsza zawartość biodostępnych form metali; testowane w stosunku do niklu, kadmu, cynku; Proces znacznego obniżenia całkowitej zawartości długi
Wapnowanie i sorbenty	Wapnowanie powoduje podwyższenie pH gleby lub osadu, co ogranicza mobilność i wymywanie większości pierwiastków śladowych. Dodatek sorbentów (np. materii organicznej, materiałów ilastych, tlenków żelaza) powoduje wzrost pojemności sorpcyjnej w stosunku do kationów metali, co przyczynia się do ich uwsteczniania	Nie powodują usuwania pierwiastków lecz obniżenie ich rozpuszczalności

Tabela 7

Potencjalne przyrodnicze metody uzdatniania osadów ściekowych zanieczyszczonych związkami organicznymi (56 z modyfikacjami)

Proces	Opis metody/ procesu	Skuteczność metody w stosunku do osadów ściekowych
Fitodegradacja/ fitotransformacja	Rozkład zanieczyszczeń wewnątrz tkanek roślinnych (głównie traw i roślin motylkowych) na skutek działania wytwarzanych przez roślinę enzymów	Metoda skuteczna w usuwaniu m.in. DDT, PCB, fenoli, węglowodorów aromatycznych i alifatycznych, herbicydów (np. atrazyny) oraz pestycydów ale przydatna głównie do remediacji skażonych gleb, brak informacji na temat przydatności do uzdatniania osadów ściekowych, jednakże może być stosowana do remediacji gleb zanieczyszczonych w/w związkami w wyniku stosowania osadów ściekowych
Ryzodegradacja	Proces, który wykorzystuje synergię pomiędzy mikroorganizmami glebowymi (bakterie, grzyby) a korzeniami roślin (głównie wierzby, trzciny, pałki szerokolistnej) a także roślin z rodziny <i>Cucurbitaceae</i>) w celu degradacji zanieczyszczeń	Metoda skuteczna w usuwaniu m.in. WWA, PCB, dioksyn i furanów; brak informacji na temat przydatności do uzdatniania samych osadów ściekowych, jednakże może być stosowana do remediacji gleb zanieczyszczonych w/w związkami w wyniku stosowania osadów ściekowych
Bioaugmentacja – szczepienie wyselekcjonowanymi bakteriami	W degradację węglowodorów zaangażowanych jest szereg mikroorganizmów, w tym takie jak: <i>Pseudomonas</i> , <i>Aerobacter</i> , <i>Alcaligenes</i> , <i>Corynebacterium</i> , <i>Flavobacterium</i> , <i>Achromobacter</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Mycobacterium</i> i <i>Nocardia</i> , a także grzyby <i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>Cunninghamella elegans</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> i <i>Syncephalastrum racemosum</i> . Dodatek wyselekcjonowanych szczepów mikroorganizmów pozwala zwiększyć skuteczność i szybkość procesu degradacji, przykładem mogą być rekombinanty bakterii degradujące PCB, które charakteryzują się zwiększoną stabilnością i przeżywalnością	Dość skuteczne w glebach w stosunku do WWA zawierających 2-4 pierścieni; Dane o skuteczności w osadach ściekowych bardzo ograniczone
Kompostowanie	Proces rozkładu i przemian materii organicznej w obecności tlenu. Końcowym produktem procesu mineralizacji i humifikacji jest kompost, z reguły pozbawiony zanieczyszczeń biologicznych oraz bogaty w materię organiczną i biogeny	Częściowo skuteczne w stosunku do związków ropopochodnych

Poprawa jakości sanitarnej osadów ściekowych

Sanitarne właściwości osadów ściekowych kształtuje wiele czynników, do których możemy zaliczyć rodzaj oczyszczalni ścieków czy metodę zastosowaną przy przeróbce osadu. Poprawienie jakości sanitarnej osadów ściekowych jest zadaniem dość trudnym, gdyż jak wynika z prowadzonych badań metody przeróbki osadów ściekowych na drodze mezofilnej fermentacji są nadal mało skuteczne (24).

Tabela 8 przedstawia skuteczność usuwania organizmów chorobotwórczych w trakcie wybranych procesów, jakim mogą podlegać osady ściekowe: sedymentacja, osad czynny, chlorowanie ścieków biologicznie oczyszczonych, wapnowanie, zastosowanie filtrów gruntowych (32).

Tabela 8

Skuteczność usuwania organizmów chorobotwórczych (32)

Proces	Usunięcie (%)			
	wirusy	bakterie	cysty ameby	jaja nicieni
sedymentacja	3	25÷75	-	19÷98
osad czynny	40÷90	-	-	10÷99
chlorowanie ścieków biologicznie oczyszczonych	-	90÷99	-	-
wapnowanie ścieków do pH=12	99,99	99	-	26,5
filtry gruntowe	40÷52	95÷98	11,0÷99,9	10÷76

Promieniowanie mikrofalowe jako źródło energii cieplnej zostało zastosowane m.in.: w procesach inżynierii środowiska. Osady ściekowe zawierają w swej masie ponad 70% wody, dzięki czemu mikrofauna może w znaczny sposób wpływać na ich cechy i strukturę. Poza tym w osadzie licznie występują bakterie, pierwotniaki, drożdże, grzyby oraz jaja pasożytów, które ulegają destrukcji pod wpływem pola magnetycznego (44).

Badania prowadzone nad fizycznym uzdatnianiem osadów ściekowych np. przy zastosowaniu promieniowania elektromagnetycznego stanowią poszukiwanie alternatywnych metod unieszkodliwiania i przeróbki osadów ściekowych. Grubel i Machnicka (17) wykazały, że zastosowanie promieni mikrofalowych dla dezintegracji osadu czynnego wpływa destrukcyjnie na ilość mikroorganizmów. Zastosowanie fal magnetycznych skutkuje polepszeniem właściwości sedymentacyjnych osadu, zmienia tzw.: indeks objętościowy (zmniejszenie z wartości 195,5 do 54,1 cm³/g s.m.), prowadzi do rozpadu jednorodnej struktury osadu, następuje uwolnienie materii organicznej z fazy stałej do fazy ciekłej (powodując znaczny wzrost wartości ChZT). Skuteczność zastosowania pola elektromagnetycznego zależna jest głównie od dawki promieniowania (określony czas działania). Najbardziej efektywne okazało się zastosowanie 3-minutowej ekspozycji osadu na działanie mikrofal (17).

Tabela 9

Potencjalne metody uzdatniania sanitarniej jakości osadów ściekowych (56, z modyfikacjami)

Proces	Opis metody/ procesu	Skuteczność metody i efekt końcowy
Suszenie	1. Suszenie konwekcyjne	Polega na bezpośrednim kontakcie suszonych osadów z nośnikiem ciepła. Gaz suszący przepływa nad osadem, a ciepło przeniesione jest z gazu do suszonego materiału. Woda parująca z osadów przechodzi do gazu suszącego i wraz z nim jest odprowadzana z urządzenia.
	2. Suszenie kontaktowe	Polega na przenieszeniu ciepła z nośnika ciepła na osady przez powierzoną wymianę (kontaktową). W procesie suszenia kontaktowego suszony materiał znajduje się na ogrzewanej nośniku ciepła powierzchni. Odparowana woda usuwana jest z urządzenia wraz z powietrzem obcym, przenikającym przez nieszczelności lub za pomocą doprowadzanego małego strumienia powietrza.
	3. Suszenie promiennikowe	Polega na wykorzystaniu promieniowania elektromagnetycznego lub promieniowania podczerwonego jako źródła ciepła.
Stabilizacja	1. Stabilizacja beztlenowa	Osady organiczne ulegają beztlenowemu rozkładowi mikrobiologicznemu na metan i ditlenek węgla. W wyniku fermentacji następuje stabilizacja i zmniejszenie objętości osadu oraz produkcja biogazu.
	2. Stabilizacja tlenowo-beztlenowa	Metoda polega na poddaniu osadów trwającej jedną dobę stabilizacji tlenowej czystym tlenem lub powietrzem a następnie fermentacji beztlenowej trwającej 12 dni. W I etapie następuje podniesienie się temperatury procesu do 57°C, a w II etapie (przeróbka termofilowa) temperatura procesu osiąga 35-55°C.
Higienizacja	1. Obróbka ciepła – pasteryzacja	Proces polega na podgrzaniu osadu i utrzymaniu jego temperatury na określonym poziomie przez pewien czas. Pasteryzacja może być prowadzona w różnych miejscach procesu technologicznego, po fermentacji, bądź stabilizacji tlenowej itp.

Higienizacja	<p>2. Metoda aktywnej pasteryzacji Bernarda połączona z otrzymywaniem nawozu granulowanego</p> <p>3. Obróbka chemiczna – stabilizacja wapnem</p> <p>4. Obróbka fizyczna - higienizacja radiacją</p> <p>5. Obróbka biologiczna – kompostowanie pryzmowe i tunelowe</p>	<p>Gazowy amoniak wprowadzany jest do odwodnionego osadu – o zawartości suchej masy $12 \div 15\%$ m – w ilości 4%.</p> <p>W wyniku reakcji egzotermicznej temperatura osadu podnosi się do około 50°C, a wartość pH osiąga 11,6. Po $5 \div 10$ minutach następuje neutralizacja alkalicznego osadu kwasem fosforowym (temp. 65°C).</p> <p>Wapnowanie jest to proces oddziaływania wapna na osad ściekowy. Wapno stosuje się w postaci wapna palonego oraz wapna hydratyzowanego.</p> <p>Metoda opiera się na egzotermicznej reakcji tlenku wapnia z wodą. Ponadto czynnikiem odkażającym jest alkaliczny odczyn osady po wprowadzeniu wapna (pH powyżej 12).</p> <p>Stosowanie wiązek przyspieszonych elektronów oraz promieniowanie. Wiązki elektronów stosowane są do wyjaławiania osadów ciekłych, natomiast promieniowanie do ciekłych, odwodnionych i suchych.</p> <p>Proces rozkładu substancji organicznych z wykorzystaniem bakterii tlenowych. Kompostowaniu mogą podlegać różne osady tj.: surowe, przefermentowane, osady mieszane, osady odwodnione, mogą być one w różnym stopniu ustabilizowane. Jedną z metod wspomagającą kompostowania jest dodawanie odpowiednich szczepów bakteryjnych, tzw. preparatów biologicznych do celu przyspieszenia biodegradacji i przemian odpadów organicznych.</p>	<p>Unieszkodliwienie bakterii chorobotwórczych. Brak precyzyjnych danych na temat skuteczności odkażenia.</p> <p>Oddziaływanie wapnowania na osad ściekowy ma na celu podwyższenie pH do wartości, przy których następuje inaktywacja enzymów i występują zmiany w budowie białek.</p> <p>Osiągnięcie redukcji patogenów na poziomie log 6, stabilizacja osadu bez ryzyka późniejszego zanieczyszczenia, usunięcie nieprzyjemnego zapachu, niskie koszty inwestycji, niewielka powierzchnia potrzebna pod zabudowę instalacji, wprowadzenie osadu z wapnem do gleby poprawia jej strukturę, zwiększa aktywność mikroorganizmów glebowych.</p> <p>Całkowite wyjałowienie osadu.</p> <p>Kompostowanie może być skutecznym rozwiązaniem w gospodarce osadowej w małych oczyszczalniach ścieków zastępując procesy stabilizacji zarówno tlenowej jak i beztlenowej oraz końcowe odwodnienie i higienizację osadów</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niski koszt higienizacji • 7 tygodni kompostowania przy temp. 60°C daje gwarancję pełnej likwidacji organizmów chorobotwórczych • Wartościowy produkt końcowy o korzystnej strukturze i właściwościach nawozowych.
--------------	---	--	---

Istotnym kierunkiem okazała się także termiczna metoda utylizacji komunalnych osadów ściekowych, zalecana w Krajowym Programie Gospodarki Odpadami. Generuje ona jednak dość wysokie koszty co oznacza, iż ten kierunek utylizacji może być preferowany przede wszystkim przez duże aglomeracje. Można mówić zatem o pewnych brakach w krajowej strategii gospodarowania osadami ściekowymi, np. braku dokumentu strategicznego (Krajowego Programu Gospodarki Osadami Ściekowymi), który nakreśliłby między innymi wizję termicznego i innych sposobów zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w szerszym aspekcie (5).

Tabela 9 przedstawia podsumowanie danych literaturowych na temat potencjalnych sposobów poprawiania jakości sanitarnej osadów ściekowych.

Podsumowanie

Rozwój wiedzy z zakresu zanieczyszczeń i metod uzdatniania komunalnych osadów ściekowych jest szczególnie istotny z uwagi na środowiskowo uzasadnioną konieczność przyrodniczego wykorzystania osadów. Docelowym kierunkiem wykorzystania dobrych jakościowo osadów staje się ich zagospodarowanie w rolnictwie, w procesach rekultywacji terenów zdegradowanych oraz produkcji kompostu i nawozów (4, 6). Powszechne składowanie osadów ściekowych jest niewskazane ze względów środowiskowych (kumulacja toksycznych substancji, które w sposób niekontrolowany przenikają do wód gruntowych i podziemnych) (26, 27) i proceduralnych.

Zebrane informacje wskazują, że komunalne osady ściekowe charakteryzują się dużym zróżnicowaniem zawartości pierwiastków śladowych i zanieczyszczeń organicznych, przy czym zawartość pierwiastków jest dość dobrze rozpoznana, również w badaniach na poziomie krajowym. Około $\frac{3}{4}$ osadów produkowanych w kraju spełnia obecne wymagania jakościowe dla stosowania osadów w rolnictwie, stanowiąc istotny rezerwuar materii organicznej i składników nawozowych do wykorzystania do nawożenia gleb. Obecne uregulowania prawne praktycznie zabezpieczają gleby przed zanieczyszczeniem potencjalnie toksycznymi pierwiastkami śladowymi ze strony komunalnych osadów ściekowych, o ile osady są stosowane zgodnie z regułami zawartymi w przepisach (dawka, zawartość pierwiastka w osadzie).

Obecne przepisy nie regulują natomiast zawartości zanieczyszczeń organicznych w osadach ściekowych, co powoduje również, że ich poziom nie jest rozpoznany w większej skali, a dostępne informacje są szczątkowe i dotyczą pojedynczych osadów. Na większą skalę nie jest badana również jakość sanitarna osadów ściekowych, poza bakteriami *Salmonella*, zarówno pod kątem występowania czynników chorobotwórczych, jak i potencjalnego ryzyka związanego z nimi w przypadku rolniczego stosowania osadów ściekowych.

Wydaje się, że niezbędne są również badania skuteczności poszczególnych przyrodniczych metod dezaktywacji zanieczyszczeń, które dość skutecznie są wprowadzane w remediacji zanieczyszczonych gleb (np. fitodegradacja, bioaugmentacja, itd.), natomiast rzadko są testowane w odniesieniu do osadów ściekowych.

Literatura

1. Alvarez E.A., Mochón M.C., Jiménez Sánchez J.C., Rodríguez M.T.: Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants. *Chemosphere* 2002, **47**: 765-775.
2. Bauman-Kaszubska H., Sikorski M.: Charakterystyka ilościowa i jakościowa osadów ściekowych pochodzących z małych oczyszczalni ścieków w powiecie plockim. *Inżynieria Ekologiczna*, 2011, **25**: 20-29.
3. Berti, W.R., Jacobs L.W.: Chemistry and phytotoxicity of soil trace elements from repeated sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.*, 1996, **25**: 1025-1032.
4. Bień J.: Osady ściekowe. Teoria i praktyka. Wyd. PCZ, Częstochowa 2007.
5. Bień J.: Zagospodarowanie komunalnych osadów ściekowych metodami termicznymi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2012, **15(4)**: 439-449.
6. Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M.: Kierunki zagospodarowania osadów w Polsce po roku 2013. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2011, **14(4)**: 375-384.
7. Budzińska K., Jurek A., Michalska M., Berleć K., Szejniuk B.: Dynamika zmian mikroflory bakteryjnej w składowanych osadach ściekowych. *Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska*, 2009, **2(86)**: 1155-1164.
8. De la Guardia M., Morales-Rubio A.: Modern strategies for the rapid determination of metals in sewage sludge. *Trends in Analytical Chemistry*, 1996, **15(8)**: 311-318.
9. Dudzińska M.R., Czerwiński J.: PCDD/F levels in sewage sludge from MWTP in South-Eastern Poland. *Organohalogen Comp.*, 2002, **57**: 305-308.
10. Dyrektywa 86/278/EWG Rady z dnia 12 czerwca 1986 w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystania w rolnictwie.
11. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008r., w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy.
12. Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999r., w sprawie składowania odpadów.
13. Eljarrat E., Caixach J., Rivera J.: Decline in PCDD and PCDF levels in sewage sludges from Catalonia (Spain). *Environ. Sci. Technol.*, 1999, **33**: 2493-2498.
14. EUROSTAT. 2015. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
15. Flis-Bujak M., Baran S., Turski R., Żukowska G.: Przemiany substancji organicznej w glebie użyźnionej osadem ściekowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 1993, **409**, 59-65.
16. G a d z i k J.: Mobilność metali ciężkich w osadach ściekowych na przykładzie wybranej oczyszczalni ścieków. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2012, **5(1)**: 5-15.
17. Gr ü b e l K., Machnicka A.: Oddziaływanie dezintegracji mikrofalowej na osad czynny. *Proceedings of ECOpole*, 2011, **5(1)**: 217-222.
18. GUS, 2010. Rocznik GUS 2010. Ochrona Środowiska, Warszawa 2010.
19. GUS, 2013, <http://www.stat.gov.pl/>
20. I g n a t o w i c z K.: Wykorzystanie niskonakładowych sorbentów do ograniczenia migracji pestycydów z mogilników do środowiska. *Inżynieria Ekologiczna*, 2011, **25**: 44-54.
21. I g n a t o w i c z K., G a r l i c k a K., B r e Ń k o T.: Wpływ kompostowania osadów ściekowych na zawartość wybranych metali i ich frakcji. *Inżynieria Ekologiczna*, 2011, **25**: 231-241.

22. K a z a n o w s k a J., S z a c i ł o J.: Analiza jakości osadów ściekowych oraz możliwość ich przyrodniczego wykorzystania. *Acta Agrophysica*, 2012, **19(2)**: 343-353.
23. K a ż m i e r c z u k M.: Metoda izolowania i identyfikacji bakterii *Salmonella* sp. w komunalnych osadach ściekowych. *Ochrona środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2010, **44**: 99-106.
24. K a ż m i e r c z u k M., K a l i s z L.: Bakterie hemolizujące proponowanym wskaźnikiem skuteczności higienizacji wapnem komunalnych osadów ściekowych. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2010, **42**: 183-191.
25. K e l e s s i d i s A., S t a s i n a k i s A.S.: Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management*, 2012, **32**: 1186-1195.
26. K i j o - K l e c z k o w s k a A., O t w i n o w s k i H., Ś r o d a K.: Properties and production of sewage sludge in Poland with reference to the methods of neutralizing. *Arch. Waste. Manag. Environ. Protect.*, 2012, **14(4)**: 59-78.
27. K ł a p e ć T., C h o l e w a A.: Zagrożenia dla zdrowia związane ze stosowaniem nawozów organicznych i organiczno-mineralnych. *Med. Ogól. Nauk. Zdr.*, 2012, **18 (2)**: 131-136.
28. K ł a p e ć T., S t r o c z y Ń s k a - S i k o r s k a M., G a l i Ń s k a E.: Helminologiczne skażenie środowiska – zagrożeniem zdrowia. *Med. Ogól.*, 2003, **9**: 347-354.
29. K r u t y s z - H u s E., C h m u r a K.: Próby wykorzystania osadów ściekowych w uprawie wierzby krzewiastej dla potrzeb energetycznych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 2008, **528**: 397-403.
30. L a t o s i Ń s k a J., G a w d z i k J.: Mobilność metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych z przykładowych oczyszczalni ścieków Polski centralnej. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 2011, **50**: 20-32.
31. M a c h e r z y Ń s k i B., W ł o d a r c z y k - M a k u ł a M.: Ekstrakcja WWA z osadów wydzielonych ze ścieków koksowniczych. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2011, **14(4)**: 333-343.
32. M a l e j J.: Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji. *Środkowo-pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska. Rocznik Ochrona Środowiska*, 2000, **2**: 69-101.
33. M a l i s z e w s k a - K o r d y b a c h B., K l i m k o w i c z - P a w ł a s A., S m r e c z a k B.: Effects of anthropopressure and soil properties on the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the upper layer of soils in selected regions of Poland. *Appl. Geochem.*, 2009, **24**: 1918-1926.
34. M a r c i n k o w s k i T.: Alkaliczna stabilizacja komunalnych osadów ściekowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, 2004, **76(43)**.
35. M a z u r T.: Rozważania o wartości nawozowej osadów ściekowych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 1996, **437**: 13-22.
36. Minister Środowiska: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, *Dz.U.* 2015 poz. 257, 2015.
37. Najwyższa Izba Kontroli: Zagospodarowanie osadów powstających w oczyszczalniach ścieków komunalnych w latach 2011-2012. Warszawa, 2013.
38. N o w a k M., K a c p r z a k M., G r o b e l a k A.: Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach re mediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2010, **13(2)**: 121-131.
39. O l e s z e k - K u d ł a k S., G r a b d a M., C z a p l i c k a M., R o s i k - D u l e w s k a Cz., S h i b a t a E., T a k a s h i N.: Fate of PCDD/PCDF during mechanical-biological sludge treatment. *Chemosphere*, 2005, **62**: 389-397.

40. O l e s z c z u k P.: Changes of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of sewage sludges with chosen physico-chemical properties and PAHs content. *Chemosphere*, 2007, **67**: 582-591.
41. O l e s z c z u k P.: Zanieczyszczenia organiczne w glebach użyźnianych osadami ściekowym Część I. *Przegląd Badań. Ecological Chemistry and Engineering*, 2007, **14(S1)**: 65-76.
42. O l e s z c z u k P.: The Tenax fraction of PAHs relates to effects in sewage sludges. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**: 1320-1325.
43. O l e s z c z u k P., H a l e S.E., L e h a m a n n J., C o r n e l i s s e n G.: Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge. *Bioresource Technology*, 2012, **111**: 84-91.
44. R a d o s z M.: Badania nad możliwością zastosowania mikrofal do higienizacji osadów ściekowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2005, **2**: 24-26.
45. R a p p e C., B e r g e k S., F i e d l e r H., C o o p e r K.: PCDD and PCDF contamination in catfish feed from Arkansas, USA. *Chemosphere*, 1998, **36**: 2705-2720.
46. S e ń c z u k W.: Toksykologia współczesna. Wyd. Lekarskie PZWL, Warszawa, 2005.
47. S i e b i e l e c G., S m r e c z a k B., K l i m k o w i c z - P a w l a s A., M a l i s z e w s k a - K o r d y b a c h B., T e r e l a k H., K o z a P., Ł y s i a k M., G a ł ą z k a R., P e c i o M., S u s z e k B., M i t u r s k i T., H r y ń c z u k B.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa, 2012.
48. S i e b i e l e c G., S t u c z y ń s k i T.: Metale śladowe w komunalnych osadach ściekowych wytwarzanych w Polsce. *Proceedings of ECOpole*, 2008, **2(2)**: 479-484.
49. S z a f r a n e k A.: Właściwości oraz przydatność rolnicza gleb pływych i rdzawych Wysoczyzny Kałuszyńskiej. *Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW*, Warszawa, 2000.
50. S t e w a r t A., H a r r a d S.J., M c L a c h l a n M.S., M c G r a t h S.P., J o n e s K.C.: PCDD/Fs and non o-PCBs in digested UK sewage sludges. *Chemosphere*, 1995, **30**: 51-67.
51. S t u c z y ń s k i T., S i e b i e l e c G., K u k l a H.: Badania mechanizmów sorpcji metali ciężkich w osadach ściekowych w różnych warunkach środowiskowych z uwzględnieniem procesów technologicznych oczyszczania ścieków i przeróbki osadów. Raport z realizacji projektu badawczego Nr 6P04G 07020 finansowanego przez KBN, 2004.
52. S u m p t e r J.P., J o h n s o n A.C.: Lessons from Endocrine Disruption and Their Application to Other Issues Concerning Trace Organics in the Aquatic Environment. *Environ. Sci. Technol.*, 2005, **39**: 4321-4332.
53. T e r e l a k H., M o t o w i c k a - T e r e l a k T., P o n d e l H., M a l i s z e w s k a - K o r d y b a c h B., P i e t r u c h C z.: Monitoring chemizmu gleb Polski. Program badań i wyniki wstępne. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska, IUNG Puławy, Warszawa, 1999.
54. T e r e l a k H., S t u c z y ń s k i T., M o t o w i c k a - T e r e l a k T., M a l i s z e w s k a - K o r d y b a c h B., P i e t r u c h C z.: Monitoring chemizmu gleb ornych Polski w latach 2005-2007. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 2008.
55. U r b a n i a k M., 2013. Biodegradation of PCDDs/PCDFs and PCBs. W: Chamy R. I Rosenkranz F., *Biodegradation – Engineering and Technology*. ISBN 978-953-51-1153-5, 73-100.
56. U r b a n i a k M., W y r w i c k a A., K i e d r z y ń s k a E., S t a n i a k S., G a ł ą z k a A., T o ł o c z k o W., S i e b i e l e c G., 2014. Problematyka przyrodniczego wykorzystania komunalnych osadów ściekowych. *Acta Innovations*, 12: 35-48.

57. Ustawa o odpadach. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2013 r. poz. 21, z późn. zm.), 2015.
 58. X i a n g L., C h a n L.C., W o n g J.W.C.: Removal of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge by isolated indigenous iron-oxidizing bacteria, *Chemosphere*, 2000, 41: 283-287.
 59. Ż u k o w s k a G., F l i s - B u j a k M., B a r a n S.: Wpływ nawożenia osadem ściekowym na substancję organiczną gleby lekkiej pod uprawą wikliny. *Acta Agrophysica*, 2002, 73: 357-367.
-

Adres do korespondencji:

mgr inż. Sylwia Siebielec
Zakład Mikrobiologii Rolniczej
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel. (81) 47 86 952
email: sstaniak@iung.pulawy.pl