

Witold Niemiec
Feliks Stachowicz
Tomasz Trzepieciński
Marta Wójcik

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

OBRÓBKA KOMUNALNEGO OSADU ŚCIEKOWEGO PRZEZNACZONEGO DO NAWOŻENIA PLANTACJI ROŚLIN ENERGETYCZNYCH

Streszczenie

Problemy zagospodarowania ścieków komunalnych nadal występują w każdej społeczności współczesnego świata, pomimo możliwości stosowania w praktyce różnych technologii ich zagospodarowania. Proste niskonakładowe sposoby zostały wyczerpane z powodu głównie poważnego zagrożenia sanitarnego, jakie stwarza deponowanie osadów w środowisku. Osady komunalne mogą być nadal stosowane do celów nawozowych w uprawach roślin energetycznych i przemysłowych. W Politechnice Rzeszowskiej od wielu lat trwają prace naukowo-badawcze związane z wytworzeniem nowych środków technicznych, które można zastosować w mechanizacji upraw małych i średniej wielkości plantacji roślin energetycznych i przemysłowych, zgodnie z aktualnymi wymogami w zakresie ochrony środowiska i ekonomiki produkcji. Coraz częściej stosowane są w turystyce paliwa na bazie biomasy do celów grzewczych, co pociąga za sobą zwrócenie większej uwagi na wykorzystanie lokalnych zasobów palnej biomasy szczególnie zdrewniałych pędów roślin.

W opracowaniu, będą wskazane możliwości produkcji drewna opałowego (wierzba energetyczna) na potrzeby turystyki z zachowaniem poprawnego sposobu zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych pochodzących z niewielkich oczyszczalni w celu wykorzystania ich jako nawozu na plantacjach roślin energetycznych i przemysłowych.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, biomasa, plantacje roślin energetycznych, wierzba energetyczna

THE PROCESSING OF SEWAGE SLUDGE IN ORDER TO FERTILIZE OF ENERGETIC PLANTS PLANTATIONS

Summary

In spite of the various technologies concerning the application of sewage sludge, the problem of its management still occur in every community of the modern world. In recent years, uncomplicated and low-budget methods of sewage sludge disposal have been forbidden. The deposition of sewage sludge in the environment causes a serious health risk for both people and animals. Municipal sewage sludge could be still used for fertilizing energetic plants plantations. For many years, Rzeszow University of Technology has developed new technical innova-

tions designed to the proper utilization of sewage sludge. These technical solutions could be used for the mechanization of small and medium energetic and industrial plants 'plantations. These devices meet environmental protection requirements and economic requirements. More and more often in tourism, it is popular to produce fuel from biomass. This fuel could be used for heating purposes in order to the pointing out of local biomass, particularly woody stems of plants.

This paper presents the possibility of production fuel from willow trees in tourism, including the correct methods of sewage sludge management in small treatment plants. Sewage sludge could be used as a valuable organic fertilizer in energetic and industrial plants 'plantations.

Keywords: sewage sludge, biomass, energetic plants 'plantations, energetic willow

1. Wprowadzenie

Gospodarka osadami ściekowymi, do niedawna traktowana jako zagadnienie drugorzędowe w oczyszczalniach ścieków, wymaga poszukiwania nowych rozwiązań korzystnych pod względem technologicznym, ekologicznym i ekonomicznym. Osady ściekowe, będące ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków, należą do tego rodzaju odpadów, których powstawania nie można ograniczyć ani wyeliminować. Coraz większa ilość wytwarzanych osadów ściekowych jest problemem występującym na całym świecie w związku z przyłączaniem do systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę i zbiorowego odprowadzenia ścieków nowych odbiorców.

W krajach Unii Europejskiej wytwarza się łącznie w ciągu roku ponad 10 mln ton s.m. osadów ściekowych [6]. Jednostkowy wskaźnik produkcji suchej masy (s.m.) osadów ściekowych w przeliczeniu na jednego mieszkańca wynosi około 17,7 kg s.m./M-rok. Najwięcej osadów wytwarzają kraje wysoko rozwinięte, należące do tzw. UE-15, których akcesja do Unii Europejskiej nastąpiła do 1995 r. W powyższych państwach, z uwagi na wysoki poziom przyłączenia mieszkańców do sieci kanalizacyjnej (około 95%), produkowanych jest łącznie ponad 87% wszystkich osadów.

Osady ściekowe zagospodarowywane są metodami termicznymi lub poprzez ich zastosowanie w rolnictwie, z tendencją do dalszego rozwoju termicznej utylizacji. Pozostałe kraje członkowskie (UE-12) wytwarzają znacznie mniej (około 11,9 kg s.m. osadów /M-rok). Dominującą metodą zagospodarowania osadów w państwach UE-12 jest ich składowanie lub rolnicze wykorzystanie, przy niewielkim udziale metod termicznych (średnio 5%) [2]. W Polsce w latach 2010–2013 wytworzono średnio 570 Mg s.m. osadów/rok. Dane zawarte w Krajowym Planie Gospodarki Odpadami (KPGO 2014) wskazują, że około 58% całkowitej ilości komunalnych osadów ściekowych powstaje w aglomeracjach powyżej 100 000 RLM, 29% w aglomeracjach wielkości 15 000–100 000 RLM, a 13% w małych aglomeracjach, liczących poniżej 15 000 RLM. Zapisy KPGO 2014 przewidują, że w 2022 r. wytworzonych zostanie łącznie około 750 000 Mg s.m. osadów ściekowych, co wskazuje na ponad 250-procentowy wzrost w stosunku do ilości wytworzonej w roku 1994 [20].

Coraz większa masa produkowanych rocznie osadów ściekowych wymusza konieczność poddania osadów odpowiedniej metodzie przeróbki i późniejszej utylizacji, zależnej od ich składu, ilości oraz sposobu oddziaływania na środowisko. Dotychczas

w Polsce dominowały trzy główne metody zagospodarowania osadów: składowanie, przyrodnicze i rolnicze wykorzystanie oraz termiczne przekształcanie. Wobec obowiązującego od 1 stycznia 2016 r. zakazu składowania odpadów o wartości opałowej powyżej 6 MJ/kg s.m., w tym również osadów ściekowych, obserwuje się wyraźną tendencję wzrostową w kierunku ich stosowania w rolnictwie.

Metody rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych należą do najtańszych sposobów utylizacji, ale wykazują ograniczenia w związku z powtórным włączeniem niektórych substancji w przewód pokarmowy człowieka. Alternatywnym rozwiązaniem dla rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych może być ich wykorzystywanie do nawożenia plantacji roślin energetycznych i przemysłowych. Rośliny energetyczne wykazują duże zapotrzebowanie na składniki pokarmowe oraz charakteryzują się dużą powierzchnią chłonną [17]. Cechy fizjologiczne roślin energetycznych umożliwiają pobieranie im substancji odżywczych zawartych w osadach bez stwarzania zagrożenia dla środowiska. Właściwości roślin energetycznych przyczyniają się do zachowania krążenia składników pokarmowych, co zamyka obieg pierwiastków w lokalnym ekosystemie.

W prezentowanym artykule wskazano nowy sposób nawożenia plantacji roślin energetycznych za pomocą komunalnych osadów ściekowych oraz możliwość produkcji biomasy w celu propagowania zasad zrównoważonego rozwoju w turystyce.

2. Podstawy prawne dotyczące zagospodarowania osadów ściekowych

Racjonalne funkcjonowanie gospodarki osadami ściekowymi powinno uwzględniać obowiązujące przepisy prawne, regulujące podstawowe kwestie związane z ich zagospodarowaniem. Ze względu na zagrożenia wynikające z niewłaściwego postępowania z osadami ściekowymi, do zasad gospodarki osadami odwołują się podstawowe akty prawne: Konstytucja RP, ustawy oraz rozporządzenia. Wszystkie zapisy zawarte w prawie unijnym i krajowym dotyczące osadów ściekowych mają na celu ochronę środowiska naturalnego i wspieranie zasad zrównoważonego rozwoju.

Wzrost zainteresowania problemami dotyczącymi utylizacji osadów ściekowych przyczynia się do implementowania przez państwa coraz bardziej rygorystycznych norm. Gospodarkę osadami ściekowymi w Polsce reguluje Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach [22]. Zapisy ustawy dopuszczają stosowanie osadów ściekowych w przypadku, gdy są one ustabilizowane oraz poddane procesom obróbki fizycznej, chemicznej lub biologicznej celem obniżenia podatności osadów na zagniwanie. Zgodnie z funkcjonującą w gospodarce odpadami „zasadą bliskości” osady ściekowe powinny być przetworzone w miejscu ich powstawania lub w przypadku braku takiej możliwości, mogą być przekazane do najbliższych położonych miejsc ich przetworzenia, z uwzględnieniem najlepszej dostępnej techniki BAT. Ustawa zabrania przetwarzania osadów ściekowych na terenie innego województwa niż to, na którym wytworzono osady, z wyjątkiem gdy odległość od miejsca ich wytworzenia do miejsca utylizacji na terenie innego województwa jest mniejsza niż odległość do miejsca ich zagospodarowania na terenie tego samego województwa [21].

Aktem wykonawczym Ustawy o odpadach jest Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych [21]. Zgodnie z zapisami zawartymi w rozporządzeniu osady ściekowe mogą być stosowane:

- ◆ w rolnictwie,
- ◆ do rekultywacji gruntów, w tym również na cele rolne,
- ◆ do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu,
- ◆ do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz.

Osady ściekowe mogą być stosowane w postaci płynnej, mazistej lub ziemistej. Osady w postaci płynnej wprowadza się do gruntu metodą iniekcji lub natryskiwania, w tym hydroobsiewu. Mazista lub ziemista forma osadów ściekowych wymaga równomiernego ich rozprowadzenia na powierzchni gruntu i niezwłocznego zmieszania. Komunalne osady ściekowe należy wprowadzić do gruntu nie później niż następnego dnia po ich przetransportowaniu na nieruchomość, na której mają być one stosowane. Rolnicze zagospodarowanie osadów ściekowych uzależnione jest od jakości osadów, jakości gleby i jej przeznaczenia oraz zapotrzebowania roślin na składniki pokarmowe, zwłaszcza azot i fosfor [3].

Podczas stosowania osadów ściekowych w celach rolniczych należy uwzględnić wymagania dotyczące nieprzekroczenia dopuszczalnych stężeń metali ciężkich (tab. 1). Osady ściekowe stosowane w rolnictwie muszą być stabilne pod względem bakteriologicznym, tzn. nie mogą zawierać bakterii z rodzaju *Salmonella* oraz żywych jaj pasożytów jelitowych *Toxocarra sp.*, *Trichurius sp.* oraz *Alcaligenes*. Dopuszczalne jest dawkowanie osadów ściekowych na gruntach o odczynie pH powyżej 5,6 pod warunkiem nie pogorszenia jakości poszczególnych komponentów środowiska: gleby, ziemi oraz wód podziemnych i powierzchniowych. Przed zastosowaniem gruntu, na który będą wprowadzane osady ściekowe, powinien być zbadany pod kątem analizy fizyko-chemicznej przez wytwórcę odpadów. Bezpieczne pod względem sanitarnym osady mogą być stosowane na gruntach rolnych 18 miesięcy przed okresem wzrostu i rozwoju roślin w ilości 3 Mg s.m./ha/rok [21].

Wspomniane wyżej rozporządzenie dotyczące komunalnych osadów ściekowych dopuszcza stosowanie w celach rolniczych dawki skumulowanej, raz na dwa lub trzy lata w ilości odpowiednio 6 lub 9 Mg s.m./ha. Dopuszczalną dawkę komunalnych osadów ściekowych zgodnie z rozporządzeniem ustala się w sposób nie powodujący przekroczenia w wierzchniej warstwie gruntu o głębokości 0÷25 cm granicznych stężeń metali ciężkich [21].

Tab. 1. Dopuszczalna zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych

Lp.	Metal	Zawartość metali ciężkich [mg/kg s.m. osadów]		
		W rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji gruntów na cele nie rolne	Przy dostosowaniu gruntów do potrzeb wynikających z planu gospodarki odpadami
1.	Kadm	20	25	50
2.	Miedź	1000	1200	2000
3.	Nikiel	300	400	500
4.	Ołów	750	1000	1500
5.	Cynk	2500	3500	5000
6.	Rtęć	16	20	25
7.	Chrom	500	1000	2500

Źródło: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. z 2015, poz. 257)

3. Zagrożenia związane ze stosowaniem osadów ściekowych

W ostatnich latach zarówno w Polsce, jak i na świecie nastąpił wzrost świadomości ekologicznej społeczeństwa w obszarze zagrożeń powodowanych przez nieumiejętne postępowanie z osadami ściekowymi. Wynikiem tego jest budowa nowych oraz modernizacja funkcjonujących oczyszczalni ścieków z uwzględnieniem przebudowy części osadowej. Koszty przeróbki osadów ściekowych stanowią około 30÷40% kosztów inwestycyjnych i do 50% kosztów eksploatacyjnych oczyszczalni ścieków, z tego względu niezbędne jest odzyskanie chociaż części nakładów finansowych poniesionych na ich przetworzenie [1]. Osady ściekowe wytwarzane w oczyszczalniach ścieków to użyteczna materia biologiczna, która niewłaściwie przetworzona i zutylizowana stanowi poważne zagrożenie dla środowiska. Skumulowane w osadach ściekowych metale ciężkie i inne związki nadają im szkodliwe, a nawet toksyczne właściwości [3]. Niebezpieczeństwo skażenia środowiska osadami ściekowymi wymaga ich racjonalnego zagospodarowania z uwzględnieniem aspektów prawnych i ekologicznych.

Osady wytwarzane w oczyszczalniach ścieków są źródłem zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych. Związki mineralne, w tym również metale ciężkie oraz pierwiastki śladowe, stanowią zagrożenie sanitarne ze względu na brak zdolności do biodegradacji. Metale ciężkie mogą ulegać kumulacji w glebie lub też przenikać w łańcuch pokarmowy i podlegać biokoncentracji w środowisku. Źródłem metali ciężkich zawartych w osadach ściekowych jest obecność w oczyszczanych ściekach ścieków przemysłowych oraz spływy powierzchniowe z terenów zurbanizowanych. Całkowita ilość metali ciężkich zawartych w osadach zawiera się w przedziale od 0,5÷2% s.m. osadów. Badania przeprowadzone w Austrii i Wielkiej Brytanii wykazały tendencję spadkową w ilości metali ciężkich zawartych w osadach wytwarzanych w krajach Unii Europejskiej, co ma związek z wprowadzaniem nowych technologii produkcji [9]. Niebezpieczeństwo skażenia metalami ciężkimi powinno być brane pod uwagę podczas:

- ◆ rolniczego wykorzystania osadów ze względu na zagrożenia dla upraw oraz pośrednio dla zdrowia i życia ludzi,
- ◆ procesów spalania w związku z kumulacją osadów w popiołach oraz możliwością emisji do atmosfery.

Higienizacja osadów ściekowych z zastosowaniem wapna palonego CaO ze względu na wymagany odczyn pH procesu (minimum 12,5) powoduje unieruchomienie metali ciężkich do czasu utrzymania wysokiego odczynu. Wymieszanie osadów ściekowych po procesie wapnowania z glebą przyczynia się do obniżenia mobilności tych metali [2].

Stosowanie osadów ściekowych może być ograniczone ze względu na obecność toksycznych związków organicznych, takich jak: WWA, PCB oraz dioksyny TCDD. Źródłem substancji organicznych zawartych w osadach są ścieki przemysłowe pochodzące z rafinerii oraz miejsc wydobycia i przeróbki węgla. Związki organiczne mogą ulegać procesom parowania, sorpcji oraz rozpuszczania w cieczy nadosadowej. W wyniku przemian chemicznych powstają produkty pośrednie, często bardziej toksyczne niż substraty. Obecność niektórych substancji organicznych może być zredukowana w procesach stabilizacji, ale nie w stopniu wystarczającym.

Wśród toksycznych związków organicznych zawartych w osadach należy uwzględnić również substancje farmaceutyczne: kwas acetylosalicylowy, diklofenak oraz nitrofenol. Obecność substancji toksycznych w osadach kwalifikuje je jako odpad niebezpieczny i wyklucza możliwość przyrodniczego stosowania. Niestety, niewiele krajów limituje zawartość związków organicznych w osadach, a próby wprowadzenia nowelizacji dyrektywy osadowej z uwzględnieniem zapisów dotyczących zawartości substancji organicznej nie znalazły dotychczas poparcia.

Badania przeprowadzone przez Lombiego [11] wykazały niebezpieczeństwo akumulacji w osadach ściekowych nanocząstek, powstających podczas procesów produkcyjnych w zakładach kosmetycznych. Większość nanocząstek ulega adsorpcji przez osady ściekowe i nie dostaje się do ścieków oczyszczonych, jednak zdarzają się przypadki obecności nanocząstek w wodach powierzchniowych po przejściu przez ciąg technologiczny oczyszczalni ścieków. Mała ilość badań dotyczących akumulacji nanocząstek w osadach ściekowych oraz zdolności do transformacji utrudniają wyznaczenie ich toksycznego wpływu na środowisko. Nie przeprowadzono badań umożliwiających określenie stopnia redukcji ilości nanocząstek w procesach higienizacji, w związku z czym stosowanie nawozów na bazie osadów ściekowych może powodować ich kumulację w roślinach.

Osady ściekowe są zróżnicowane pod względem mikrobiologicznym. Do osadów mogą przechodzić obecne w ściekach mikroorganizmy: bakterie, wirusy, pierwotniaki, jaja helmintów. Wśród nich występują zarówno organizmy patogenne oraz saprofityczne. Przy dalszym wykorzystaniu osadów ściekowych do celów rolniczych należy wziąć pod uwagę możliwość skażenia sanitarnego gleby. Stosowane procesy przeróbki osadów, w tym stabilizacja, nie zapewniają wymaganego stopnia redukcji mikroorganizmów zawartych w osadach, a dostające się do gleby zanieczyszczenia biologiczne mogą naruszyć równowagę biocenotyczną. Proces higienizacji osadów ściekowych wapnem powoduje skuteczną dezaktywację organizmów chorobotwórczych. Badania wykazały, że większość bakterii i wirusów ginie przy odczynie pH powyżej 9. Destrukcja bakterii *Coli* oraz jaj *Ascaris perfingers* następuje przy odczynie pH 12,5÷13,0 [2].

Proces wapnowania osadów ściekowych umożliwia skuteczne zniszczenie liczby mikroorganizmów zawartych w ściekach, powodując powstanie produktu mogącego znaleźć zastosowanie w rolnictwie. Należy jednak podkreślić, że destrukcja organizmów patogennych wymaga zastosowania dużych dawek wapna, w ilości nawet do 1kg CaO/kg s.m. Ze względu na wysokie zużycie wapna stosowanego do produkcji nawozów mineralno-organicznych na bazie osadów ściekowych wymagane jest racjonalne ich wprowadzanie do gruntu celem uniknięcia tzw. przenawożenia gleby. Rolnictwo intensywne z zastosowaniem dużych dawek nawozów powoduje, że składniki nawozowe nie są szybko przyswajane przez rośliny i ulegają wymywaniu z wodami opadowymi [19]. Nadmierne ilości wapna są przyczyną skażenia wód podziemnych i powierzchniowych oraz zjawiska „przewapnowania gleby”, powodującego szkodliwe zmiany: przesuszenie gleb, szybszy rozkład substancji organicznej oraz przejście niektórych składników w formy trudno przyswajalne dla roślin. Nadmierne nawożenie gleb może spowodować negatywny efekt w postaci pogorszenia jakości lub nawet ograniczenia uzyskiwanych plonów [15].

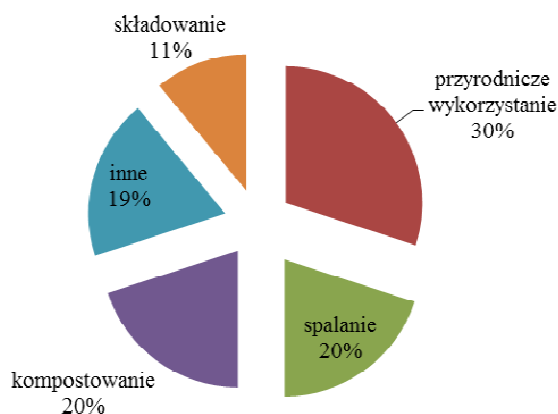
Poprawne wykorzystanie osadów ściekowych do nawożenia plantacji roślin energetycznych umożliwia ich zagospodarowanie w sposób bezpieczny dla człowieka, bez ingerencji w łańcuch troficzny zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju [14].

4. Rozwiązanie techniczne dotyczące obróbki i zagospodarowania osadów ściekowych

Rozbudowa sieci kanalizacyjnej oraz budowa i modernizacja oczyszczalni ścieków powoduje powstawanie coraz większej masy osadów ściekowych. W zależności od stopnia rozwoju danego państwa dominuje inny sposób ostatecznego zagospodarowania osadów ściekowych.

W Stanach Zjednoczonych osady poddawane są procesom obróbki termicznej, kompostowaniu lub są wykorzystywane przyrodniczo (ryc. 1). Obowiązujące w USA regulacje prawne dopuszczają stosowanie tylko ustabilizowanych osadów w postaci stałej lub ciekłej [12]. W Stanach Zjednoczonych około 20% osadów ściekowych poddaje się termicznemu unieszkodliwianiu poprzez spalanie lub współspalanie. Powstające podczas procesu popioły w zależności od ich właściwości fizykochemicznych, unieszkodliwiane są z wykorzystaniem metod wysoko zaawansowanych (ON-line oraz OFF-line). Metoda ON-line polega na przekształceniu popiołów w procesie spalania w postać płynną, która w kolejnym etapie poprzez skokowe schłodzenie ulega witrifikacji. Przykładem instalacji wykorzystującej metodę ON-line jest tzw. technologia Glass Pack. Instalacje pracujące z wykorzystaniem metody OFF-line wyposażone są w urządzenie, wykorzystujące energię plazmy do uzyskania płynnej postaci popiołów.

Ryc. 1. Procentowy udział metod zagospodarowania osadów ściekowych w USA



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: J. Malej, *Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji*, Rocznik Ochrony Środowiska, t. 2, Koszalin 2000, s. 69–101.

W kolejnym etapie popioły ulegają schłodzeniu skokowemu, w wyniku czego otrzymywany jest witrifikat mający cechy szkła. Innowacyjną metodą zagospodarowania osadów ściekowych stosowaną w Stanach Zjednoczonych jest wspomniana wcześniej witrifikacja, umożliwiająca unieszkodliwianie osadów o podwyższonej zawartości metali ciężkich oraz substancji niebezpiecznych, pochodzących zwłaszcza z oczyszczalni o znacznej przewodzie ścieków przemysłowych. Procesowi poddaje się najczęściej mieszaninę osadów ściekowych ze stłuczką szklaną w ilościach 35% osadów oraz 65% stłuczki. Witrifikację prowadzi się w piecu plazmowym z wykorzystaniem tlenu lub argonu jako gazu plazmotwórczego o stałym przepływie gazu na poziomie 20 dm³/min. Mieszaninę osadu ściekowego oraz stłuczki szklanej poddaje się działaniu plazmy przez około 10 minut. Uzyskane w procesie witrifikaty charakteryzują się twardością rzędu 6,5÷7 w skali Mohsa oraz szklaną powierzchnią umożliwiającą ich dalsze zastosowanie w budownictwie [4].

Podobne sposoby zagospodarowania osadów ściekowych oraz unieszkodliwiania popiołów pochodzących z procesu spalania stosuje się w Europie. W zależności od stopnia rozwoju gospodarczego, dominują metody termiczne lub przyrodniczego wykorzystania osadów (tab. 2). Składowanie, w związku z wprowadzeniem zakazu w większości państwach, stosowane jest już na mniejszą skalę, chociaż w krajach bałkańskich, m.in. w Rumunii i Bułgarii, jest to nadal jeden z najpopularniejszych sposobów utylizacji osadów.

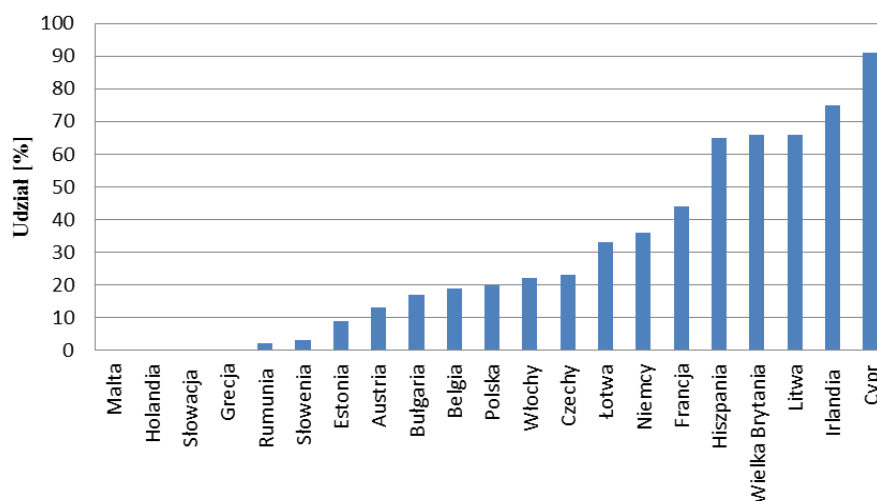
Tab. 2. Sposoby zagospodarowania osadów ściekowych w wybranych krajach Unii Europejskiej w latach 2010-2013

Kraj	Osady	Sucha masa	Sposób przeróbki osadów ściekowych [%]		
	[tys. ton/rok]	[kg s.m./rok]	rolnictwo	spalanie	inne metody
Polska	563	14,76	26	2	72
Niemcy	2049	24,99	53	47	0
Czechy	220	20,94	78	1	21
Austria	254	30,28	38	36	26
Węgry	260	25,95	60	1	39

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: J. Bień, *Unieszkodliwianie komunalnych osadów ściekowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2014, s. 7.

Jedną z najbardziej popularnych metod utylizacji osadów ściekowych (około 39% całkowitej ilości osadów) w Unii Europejskiej jest ich rolnicze wykorzystanie (ryc. 2). Dyrektywa w sprawie osadów ściekowych wymaga, aby osady przed ich wykorzystaniem w rolnictwie poddano procesowi stabilizacji, celem zmniejszenia zagrożenia dla środowiska [24].

Ryc. 2. Procentowy udział rolniczego wykorzystania osadów ściekowych w wybranych krajach europejskich w latach 2008-2012



Źródło: Opracowanie własne na podstawie: J. Malej, *Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji*, Rocznik Ochrony Środowiska, t. 2, Koszalin 2000, s. 69-101.

Rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych jest popularne z uwagi na niskie koszty związane z zagospodarowaniem osadów, w porównaniu do innych bardziej zaawansowanych metod (tab. 3). Analizując dane zawarte w tabeli 3, można zauważyć, że unieszkodliwianie osadów ściekowych w Niemczech charakteryzuje się wyższymi kosztami w przypadku każdej z metod. Powyższą zależność Henclik przypisuje wyższemu stopniowi mechanizacji w gospodarce osadowej w Niemczech i tym samej większej awaryjności urządzeń, co jednoznacznie przekłada się na wyższe koszty [7].

Tab.3. Koszt zagospodarowania 1 Mg osadów ściekowych różnymi metodami w Polsce oraz w Niemczech

Sposób zagospodarowania	Koszt [zł]	
	Polska	Niemcy
W rolnictwie	300	900
Kompostowanie	600	920
Spalanie	1500	1700
Współspalanie	1750	1800

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: A. Henclik, J. Kulczycka, K. Gorazda, Z. Wzorek, *Uwarunkowania gospodarki osadami ściekowymi w Polsce i Niemczech, Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 17, nr 2, 2014, s.185–197.

Pomimo stosunkowo niskich nakładów finansowych, w wielu krajach Europy Zachodniej, podejmowane są działania w celu zmniejszenia udziału rolniczego wykorzystania osadów ściekowych. Jednym ze sposobów ograniczających wymienioną metodę utylizacji jest wprowadzanie bardzo rygorystycznych norm dotyczących zawartości metali ciężkich w osadach, celem zmniejszenia niebezpieczeństwa nagromadzenia się związków organicznych oraz substancji niebezpiecznych w glebie. Negatywny stosunek społeczeństwa w wielu krajach, dotyczący wykorzystania osadów ściekowych w rolnictwie, spowodował, że rządy niektórych krajów Unii Europejskiej ograniczyły, a nawet całkowicie zabroniły stosowania powyższej metody utylizacji osadów. Szwajcaria oraz Holandia całkowicie zakazały rolniczego wykorzystania osadów. Ograniczenie udziału osadów ściekowych w rolnictwie realizowane jest poprzez budowę spalarni w oczyszczalniach ścieków oraz dotacje dla rolników, którzy nie stosują osadów ściekowych [6].

Alternatywnym rozwiązaniem dla rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych w krajach wysoko rozwiniętych Unii Europejskiej jest spalanie oraz inne metody termicznego przekształcania. We Flandrii ponad 70% osadów jest spalanych, natomiast w Szwajcarii zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi od października 2006 r. 100% osadów przekształca się termicznie. Popularne jest również suszenie osadów metodami termicznymi lub z wykorzystaniem energii słonecznej, stosowane we wszystkich krajach tzw. UE-15 (z wyjątkiem Luksemburgu). Pomimo upowszechniania metod termicznych, w wielu krajach europejskich ze względów ekonomicznych powyższy sposób utylizacji osadów stosuje się tylko w dużych aglomeracjach [13].

Coraz bardziej popularną w ostatnich latach metodą zagospodarowania osadów ściekowych jest ich współspalanie w elektrowniach lub cementowniach. Proces współspalania wymaga dodatku osadów ściekowych w ilości nawet 20÷30% i prowadzony jest, m.in. w Holandii, Austrii, Niemczech i Wielkiej Brytanii. W wielu krajach metoda jest częściej stosowana niż sam proces spalania, m.in. w Niemczech. Przeprowadzone w Heilbronn badania wykazały, że w przypadku współspalania z węglem odwodnionych osadów o zawartości suchej masy około 25% w ilości stanowiącej 4% udziału w mieszance paliwowej nie zaobserwowano również negatywnych skutków oddziaływania na środowisko, w porównaniu do spalania wyłącznie węgla kamiennego [7]. Należy jednak zaznaczyć, że metody termicznej utylizacji osadów ściekowych charakteryzują się najwyższymi kosztami, nawet 2÷3-krotnie wyższymi niż w przypadku ich

rolniczego zagospodarowania. W krajach o niższym stopniu uprzemysłowienia, ze względu na wysokie koszty, metody termiczne mają uzasadnienie tylko w przypadku dużych aglomeracji lub grup oczyszczalni ścieków produkujących ponad 10 000 ton s.m. rocznie.

Gospodarka osadami ściekowymi w Polsce jest stosunkowo młodą dziedziną gospodarki odpadami i nie doczekała się uznanych w kraju standardów. O wyborze najbardziej optymalnego sposobu utylizacji osadów ściekowych decyduje ich jakość, a zwłaszcza zawartość metali ciężkich. Wobec obowiązującego od 1 stycznia 2016 r. zakazu składowania osadów ściekowych zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach [23], za najbardziej racjonalną i uzasadnioną ekonomicznie metodę utylizacji uznaje się ich rolnicze wykorzystanie. Rolniczo-przyrodnicze sposoby zagospodarowania osadów ściekowych są dozwolone prawnie pod warunkiem spełnienia wymogów, zawartych we wcześniej wspomnianym Rozporządzeniu w sprawie komunalnych osadów ściekowych. W praktyce powyższa metoda nie nadaje się dla osadów wytwarzanych w dużych oczyszczalniach ścieków z uwagi na nadmierną zawartość metali ciężkich oraz zagrożenie sanitarne [3].

Coraz więcej działających oczyszczalni ścieków stosuje proces higienizacji osadów z użyciem wapna, celem produkcji mineralno-organicznego nawozu, wytwarzanego z osadów ściekowych. Wyprodukowany preparat ze względu na wysoką zawartość wapna działa odkażająco na glebę oraz stanowi cenne źródło substancji nawozowych dla roślin: azotu, fosforu oraz potasu. Nawóz może stanowić alternatywę dla powszechnie stosowanych w rolnictwie nawozów mineralnych. Wprowadzenie procesu higienizacji i aglomeracji z zastosowaniem wapna wymaga rozbudowy oczyszczalni ścieków oraz zainstalowania nowych urządzeń umożliwiających produkcję granulatu osadowo-wapiennego. Jak wykazały badania własne, koszty inwestycyjne wdrożenia instalacji do higienizacji i aglomeracji osadów ściekowych z użyciem wapna dla średniej wielkości oczyszczalni ścieków (o przepustowości 2150 m³/d) wynoszą około 235 000 zł (tab. 4). Proces wymaga stosowania wapna palonego wysoko reaktywnego o czasie gaszenia t_{60} poniżej 1 minuty w ilości 0,15÷0,25 kg CaO/kg s.m. W praktyce dawkuje się wapno w ilości 22÷23% stężenia suchej masy osadu ściekowego. W zależności od odległości transportu, koszt 1 tony wysoko reaktywnego wapna mieści się w granicach 290÷350 zł/ tonę, co generuje dodatkowe roczne koszty w przypadku średniej oczyszczalni ścieków na poziomie 50 000 zł.

Wobec stopniowego wprowadzania w wielu krajach zakazu lub ograniczenia rolniczego zagospodarowania osadów ściekowych, coraz większe znaczenie zyskuje ich zastosowanie do celów energetycznych. W Politechnice Rzeszowskiej od kilku lat prowadzone są badania nad wykorzystaniem osadów ściekowych do nawożenia plantacji roślin energetycznych i przemysłowych. Metoda zagospodarowania osadów ściekowych do produkcji biomasy drzewnej stanowi odpowiedź na zmniejszające się zasoby konwencjonalnych paliw na świecie. Wzrost zainteresowania biomasą wynikający z zapisów zawartych w tzw. pakcie energetyczno-klimatycznym (3 x 20%) może przyczynić się do wdrożenia wyżej wymienionego sposobu utylizacji na większą skalę.

Tab. 4. Koszty zagospodarowania osadów ściekowych w procesie higienizacji i aglomeracji

Urządzenie	Koszt urządzenia brutto [w zł]
Zasobnik wapna z instalacją przeciw zbrylaniu z podajnikiem wapna	61 500
Dozownik wapna	8200
Przenośnik ślimakowy wapna	12 300
Mieszacz	43 100
Przenośnik ślimakowy osadu	18 500
Przenośnik ślimakowy mieszaniny osadu i wapna	18 500
Automatyczne sterowanie	13 500
Dostawa urządzeń do oczyszczalni ścieków	60 000
KOSZT INWESTYCYJNY	235 600

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych udostępnionych przez Oczyszczalnię Ścieków w Sędziszowie Małopolskim

Nawożenie roślin energetycznych z zastosowaniem osadów ściekowych wymaga wprowadzenia ich na odpowiednią głębokość oraz natychmiastowego przykrycia glebą, czego nie zapewniają dostępne na rynku maszyny do dawkowania nawozów. Nawiązując do obowiązujących aktów prawnych dotyczących gospodarki osadami ściekowymi, Politechnika Rzeszowska zaprojektowała urządzenie do podpowierzchniowego wprowadzania do gleby sypkich nawozów organicznych i mineralnych (fot. 1). Urządzenie według patentu PL 382062 należy do tzw. parku maszyn opracowanych w Politechnice Rzeszowskiej i w porównaniu do powszechnie stosowanych dozowników nawozu zapewnia natychmiastowe przykrycie nawozu glebą, co jest korzystne pod względem ekologicznym.

Konstrukcja urządzenia została dostosowana do nawożenia plantacji roślin energetycznych dzięki rozstawowi narzędzi wynoszącemu 0,7 m, co odpowiada typowemu systemowi sadzenia wierzby energetycznej. Niewątpliwą zaletą urządzenia jest możliwość mocowania modułu do typowych rozrzutników nawozu, bez konieczności specjalnego dostosowywania. Cechą urządzenia do dogłębowego dawkowania osadów sypkich do gruntu jest możliwość połączenia procesu nawożenia i transportu osadów ściekowych, umożliwiając ich wprowadzenie na głębokość $0,05 \div 0,25$ m z jednoczesnym przykryciem warstwą gleby. Zabieg umożliwia lepsze przyswajanie substancji pokarmowych przez rośliny dzięki wprowadzeniu nawozu w pobliże bryły korzeniowej bez ryzyka jej uszkodzenia, co ma zastosowanie zwłaszcza w przypadku plantacji roślin.

Poprzez wprowadzenie osadu ściekowego na odpowiednią głębokość i natychmiastowe wymieszanie z glebą, urządzenie do dogłębowego dawkowania osadów ściekowych przyczynia się do ograniczenia uciążliwości zapachowej i utraty lotnych składników pokarmowych, m.in. amoniaku. Konstrukcja maszyny niweluje niebezpieczeństwo związane z ewentualnym wyciekami osadów i umożliwia dostosowanie do poruszania się po drogach publicznych zgodnie z zapisami zawartymi w ustawie o prawie drogowym. Obecnie urządzenie testowane jest w doświadczalnej plantacji wierzby energetycznej w Świlczy [18].



Fot. 1. Urządzenie do podpowierzchniowego dawkowania osadów ściekowych do gruntu: 1 – rozrzutnik nawozów, 2 – rama nośna, 3 – belka, 4 – krój tarczowy, 5 – obsypnik talerzowy, 6 – cylindryczna obudowa ślimaka, 7 – podajnik ślimakowy, 8 – komora zasypowa, 9 – silnik hydrauliczny, 10 – siłownik hydrauliczny, 11 – ramiona, 12 – nawóz

Źródło: F. Stachowicz, W. Niemiec, T. Trzepieciński, W. Ślęzak, *Innowacyjne urządzenie do aplikacji dogłębowej osadów ściekowych*, *Zeszyty Naukowe Postępów Nauk Rolniczych*, nr 576, 2014, s. 131–139.

5. Wpływ osadów ściekowych na jakość gleby w plantacji roślin energetycznych

Osady ściekowe mogą być traktowane jako cenny nawóz organiczny w rolnictwie z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju. Zastosowanie osadu jako nawozu pozwala zachować obieg składników pokarmowych i zamyka lokalny obieg pierwiastków w ekosystemie. W literaturze znanych jest wiele przykładów pozytywnego wpływu osadów ściekowych na uzyskiwany plon roślin, zwłaszcza na glebach lekkich i ubogich w materię organiczną. Wpływ stosowania osadów ściekowych na plony roślin uprawnych w warunkach polskich przedstawiono w tabeli 5 [3].

Tab. 5. Wpływ osadów ściekowych na wielkość plonów roślin w warunkach polskich

Rodzaj i dawka osadów ściekowych	Gatunek rośliny	Efekt środowiskowy
Komunalne	Gorczyca biała Łubin biały	Wzrost plonu nasion gorczycy Wzrost plonu łubinu
Komunalne 50–200 kg/ha	Salix caprea, Salix alba, Salix purpurea	Wzrost plonowania wierzby
Komunalne 2,64 t s.m./ha	Pszenica jara	Wzrost plonowania ziaren pszenicy
Komunalne 10 t s.m./ha	Groch	Wzrost biomasy
Komunalne 22 t s.m./ha	Burak cukrowy	Wzrost plonu liści i korzeni
Komunalne 28,5 t s.m./ha	Wierzba krzewiasta	Wzrost długości pędów i ich średnicy

Źródło: J. Bień i in., *Komunalne osady ściekowe – zagospodarowania energetyczne i przyrodnicze*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2015, s. 142.

Stosowanie osadów ściekowych w produkcji rolniczej stwarza ryzyko wprowadzenia do gleby i biomasy roślinnej zanieczyszczeń chemicznych oraz biologicznych. Wysoka wartość nawozowa osadów ściekowych umożliwia ich stosowanie do nawożenia plantacji roślin energetycznych. Dane udostępnione przez Agencję Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa (ARiMR) wskazują na wzrost areалу upraw roślin energetycznych w Polsce (11 508,55 ha w 2013 r.) [8]. Dzięki nawożeniu roślin niekonsumpcyjnych, związki chemiczne obecne w osadach zostają wyłączone z łańcucha troficznego człowieka i nie stanowią zagrożenia dla zdrowia. Cechy budowy roślin energetycznych umożliwiają pobieranie substancji odżywczych zawartych w osadach bez stwarzania zagrożenia dla środowiska. Ponadto rośliny energetyczne charakteryzują się wysokim zapotrzebowaniem na składniki pokarmowe oraz dużą powierzchnią chłonną.

Do prawidłowego wzrostu, plantacje roślin energetycznych wymagają powierzchniowego nawożenia sztucznymi nawozami mineralnymi z zastosowaniem rozsiewaczy nawozów. Dane zawarte w literaturze [16] wykazują, że koszty nawożenia mineralnego w trakcie prowadzenia plantacji wynoszą około 800 zł/ha/rok, co stanowi około 30÷40% całkowitych nakładów. Alternatywą mogą być odpowiednio przetworzone komunalne osady ściekowe, które z powodzeniem dostarczają cennych składników pokarmowych dla roślin i mogą stanowić substytut dla popularnych na rynku nawozów mineralnych. Stosowanie osadów ściekowych w nawożeniu roślin energetycznych pozwala uzyskać wysoką ilość biomasy na poziomie 45 Mg/ha/rok. Dla porównania, przyrost biomasy bez nawożenia osadami ściekowymi utrzymuje się na poziomie 15–20 Mg/ha/rok [10]. Oprócz zwiększenia przyrostu nadziemnej części biomasy, rośliny energetyczne uprawiane na glebach nawożonych osadami ściekowymi mają lepiej rozwinięty system korzeniowy.

W Politechnice Rzeszowskiej prowadzone są badania dotyczące stosowania odpowiednio przetworzonych osadów ściekowych do nawożenia upraw roślin energetycznych i przemysłowych. Plantacja doświadczalna, z łączną powierzchnią plantacji wierzby energetycznej około 30 ha, jest zlokalizowana w odległości 2 km od oczyszczalni ścieków w Świlczy-Kamyszyn. Monitoring jakości gleby na plantacji nie wykazał negatywnego wpływu osadów ściekowych na jakość gleby (tab. 6). Zastosowanie osadu ściekowego spowodowało wzrost stężenia Cu, Ni, Pb i Zn, jednak nie przyczyniło się to do przekroczenia granicznych wartości stężeń metali w glebie określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2001 r. w sprawie standardów jakości gleby i standardów jakości ziemi. Metale ciężkie wprowadzone do gruntu z osadami ściekowymi ulegają bioakumulacji i biomagnifikacji w roślinach energetycznych, nie przyczyniając się do skażenia gleb.

Tab. 6. Parametry gleby przed wprowadzeniem i po wprowadzeniu osadów ściekowych

Metal	Średnie stężenie metali ciężkich [mg/ kg s.m.]		Dopuszczalna wartość w glebie [mg/kg s.m.]
	Przed zastosowaniem osadu ściekowego	Po zastosowaniu osadu ściekowego	
Cd	nie wykryto	0,82±0,212	2,0
Cu	17,83±0,27	21,47±9,26	50,0
Ni	21,41±0,33	29,93±12,28	35,0
Pb	48,48±0,47	31,53±10,93	60,0
Zn	48,65±0,44	58,67±15,66	120,0
Hg	nie wykryto	0,117±0,040	1,2
Cr	78,17±1,11	29,50±9,06	75,0

Źródło: Opracowanie własne

Zagospodarowanie osadów ściekowych w celu produkcji biomasy drzewnej charakteryzuje się niskimi nakładami finansowymi. Według danych zawartych w literaturze, koszt założenia plantacji wierzby energetycznej przy ilości sadzonek 25 000 szt./ha wynosi około 3400 zł (tab. 7), co jest konkurencyjnym rozwiązaniem dla rolniczego i przyrodniczego zagospodarowania osadów ściekowych. Opłacalność produkcji wierzby energetycznej w trzech cyklach zbioru przedstawiono poniżej (tab. 8). Dodatkową zaletą założenia plantacji roślin energetycznych jest możliwość produkcji paliwa (drewno), mniej szkodliwego dla środowiska w porównaniu do węgla kamiennego [5].

Tab. 7. Przewidywane koszty założenia plantacji roślin energetycznych przy ilości sadzonek 25 000 szt./ha

Zabieg	Cena [zł]
Oprysk	17
Wysiew nawozów	16
Orka przedzimowa	77
Bronowanie	23
Koszt zakupu sadzonek	2500
Wytyczenie znaków do sadzenia	16
Sadzenie ręczne	474
Oprysk	17
Pielenie	13
Zakup środków ochrony roślin	230
Razem	3383

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych zawartych w materiałach szkoleniowych projektu Centrum Zielonych Technologii

Tab. 8. Opłacalność produkcji wierzby energetycznej w trzech cyklach zbioru

Wykaz kosztów	Zbiór w cyklu		
	jednorocznym	dwuletnim	trzyletnim
Koszt produkcji [zł/ha]	1355	1974	3011
Średnie plony biomasy [t/ha]	29	56	91
Koszt produkcji 1 tony świeżych zrębek [zł]	47	35	33
Cena za 1 tonę świeżych zrębek (8GJ x 10 zł/GJ)	80	80	80
Zysk z 1 tony [zł]	33	45	47
Zysk z 1 ha [zł]	965	2509	4269
Zysk z 1 ha/rok [zł]	965	1253	1423

Źródło: Materiały szkoleniowe projektu Centrum Zielonych Technologii na podstawie danych z badań polowych przeprowadzonych przez Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie w latach 2010–2013

6. Podsumowanie

Ostateczna utylizacja osadów ściekowych jest problemem wymagającym znalezienia docelowego rozwiązania, korzystnego pod względem ekologicznym i ekonomicznym. Racjonalna gospodarka osadami powinna uwzględniać warunki pracy oczyszczalni ścieków oraz obowiązujące standardy dotyczące postępowania z osadami. Nowoczesne technologie w zakresie utylizacji osadów ściekowych są realizowane zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych, z dominującym udziałem metod termicznych. W krajach o niższym stopniu rozwoju i uprzemysłowienia gospodarka osadami ściekowymi oparta jest na składowaniu i ich zastosowaniu w rolnictwie. Wobec obowiązującego w większości krajów Unii Europejskiej zakazu składowania osadów ściekowych, poszukiwane są nadal nowe rozwiązania umożliwiające ich efektywne zagospodarowanie.

Jedną z najpopularniejszych metod utylizacji osadów ściekowych jest ich rolnicze i przyrodnicze wykorzystanie. Coraz popularniejsza staje się produkcja nawozów wytwarzanych na bazie osadu ściekowego z dodatkiem wapna. Granulaty osadowo-wapienne stanowią alternatywę dla popularnych nawozów mineralnych z uwagi na zawartość wapna, które wykazuje właściwości odkwaszające oraz poprawiające strukturę gleby. Wadą preparatów produkowanych z wykorzystaniem osadów ściekowych jest stosowanie wysokich dawek wapna w procesie produkcji, rzędu kilkaset kilogramów na tonę osadów.

Alternatywną metodą zagospodarowania osadów ściekowych jest ich wykorzystanie w celach energetycznych. W Politechnice Rzeszowskiej od lat prowadzone są badania nad możliwością stosowania osadów ściekowych do nawożenia plantacji roślin energetycznych. Cechy budowy roślin energetycznych umożliwiają pobieranie substancji odżywczych zawartych w osadach bez zagrożenia dla środowiska. Niekonsumpcyjny charakter roślin energetycznych wykazuje brak wpływu związków chemicznych zawartych w osadach na zdrowie ludzi i zwierząt. Przeprowadzone badania wykazały, że rośliny energetyczne nawożone osadami ściekowymi charakteryzują się nawet 3-krotnie większym przyrostem biomasy, w porównaniu z uprawami bez stosowania osadów.

Dotychczasowe badania doświadczalne dotyczące wpływu osadów ściekowych na jakość gleby przeprowadzono na doświadczalnej plantacji roślin energetycznych w Świlczy. Osady ściekowe wprowadzane są do gleby na głębokość około 5÷20 cm

z zastosowaniem innowacyjnego urządzenia do podpowierzchniowego dawkowania sypkich nawozów organicznych i mineralnych. Monitoring jakości gleby nie wykazał znaczącego wzrostu stężenia metali po wprowadzeniu do gruntu odpowiednio przetworzonych osadów ściekowych. Wyniki badań wskazują na brak negatywnego wpływu osadów ściekowych na glebę i udział w zanieczyszczeniu środowiska. Zakładanie plantacji roślin energetycznych nawożonych osadami ściekowymi stanowi alternatywną metodę utylizacji osadów wytwarzanych w oczyszczalniach ścieków w stosunku do ich rolniczego stosowania oraz umożliwia zagospodarowanie nieużytków i gruntów odłogowanych. Produkcja drewna z wierzby energetycznej może przyczynić się do propagowania zasad zrównoważonego rozwoju w turystyce poprzez zwiększenie udziału energii odnawialnej w produkcji energii końcowej zgodnie z zasadą 3 x 20%.

Bibliografia

1. Bień J., Wystalska K., *Osady ściekowe. Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, s. 34–58, 293–347.
2. Bień J., *Unieszkodliwianie komunalnych osadów ściekowych*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2014, s. 5–32.
3. Bień J. i in., *Komunalne osady ściekowe – zagospodarowanie energetyczne i przyrodnicze*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2015, s. 120–147.
4. Celary P., Sołtysek-Sobik J., *Witryfikacja osadów ściekowych z przemysłu garbarskiego ze stłuczką szklaną*, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 17, nr 3, 2014, s. 449–457.
5. Dubas J., Tomczyk A., *Zakładanie, pielęgnacja i ochrona plantacji wierzb energetycznych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2005, s. 10–45.
6. Federal Environment Ministry's Advisory Assistance Programme for Environmental Protection in Central and Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia, 2014.
7. Henclik A., Kulczycka J., Gorazda K., Wzorek Z., *Uwarunkowania gospodarki osadami ściekowymi w Polsce i Niemczech*, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, t. 17, 2014, s. 185–197.
8. Kabała C., Karczewska A., Kozak M., *Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych*, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Rolnictwo XCVI*, nr 576, 2010, s. 97–118.
9. Kacprzak M., Fijałkowski K., Placek A., *Wprowadzanie osadów ściekowych do gleb zdegradowanych – ryzyko zanieczyszczenia czy źródło (bio)węgla?*, Wydawnictwo PZiTS, Poznań 2014, s. 159–168.
10. Labrecque M., Teodorescu T.I., *Influence of plantation site and wastewater sludge fertilization on the performance and foliar status two willow species grown under SRIC in southern Quebec (Canada)*, *Forest Ecology and Management*, nr 150, 2001, s. 223–239.
11. Lombi E. i in., *Transformation of four silver/silver chloride nanoparticles during anaerobic treatment of wastewater and post-processing of sewage sludge*, *Environmental Pollution*, nr 176, 2013, s. 193–197.
12. Lowman A., MacDonald M., Wing S., Muhammad N., *Land Application of Treated Sewage Sludge: Community Health and Environmental Justice*, *Environmental Health Perspectives*, nr 5, 2013, s. 537–542.
13. Malej J., *Właściwości osadów ściekowych oraz wybrane sposoby ich unieszkodliwiania i utylizacji*, *Rocznik Ochrony Środowiska*, t. 2, Koszalin 2000, s. 69–101.

14. Niemiec W., Stachowicz F., Trzepieciński T., Ślenzak W., *Wykorzystanie osadów ściekowych do nawożenia roślin energetycznych*, materiały konferencji „Metody zagospodarowania osadów ściekowych”, Iława 2015.
15. Niemiec W., Wójcik M., *Możliwości wykorzystania komunalnych osadów ściekowych w wybranych oczyszczalniach*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Mechanika, nr 87, 2015, s. 339–347.
16. Ociepa-Kubicka A., Pachura P., *Wykorzystanie osadów ściekowych i kompostu w nawożeniu roślin energetycznych na przykładzie miskanta i ślazuwca*, Annual Set the Environment Protection, nr 15, 2013, s. 2267–2278.
17. Rosikoń K., *Osady ściekowe w nawożeniu wybranych roślin energetycznych*, Inżynieria i Ochrona Środowiska, t. 17, 2014, s. 339–348.
18. Stachowicz F., Niemiec W., Trzepieciński T., Ślenzak W., *Innowacyjne urządzenie do aplikacji dogłębowej osadów ściekowych*, Zeszyty Naukowe Postępów Nauk Rolniczych, nr 576, 2014, s. 131–139.
19. Wiater J., Łukowski A., *Wstępne badania aplikacyjne granulowanych nawozów organiczno-mineralnych na bazie osadów ściekowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Inżynieria Środowiska, nr 16, 2003, s. 233–237.

Akty normatywne

20. Krajowy plan gospodarki odpadami 2014, projekt z dnia 30 lipca 2010 r., Warszawa 2010.
21. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 6 lutego 2015 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych (Dz. U. z 2015, poz. 257).
22. Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. z 2013 r., poz. 21).
23. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 16 lipca 2015 r. w sprawie dopuszczania odpadów do składowania na składowiskach (Dz. U. z 2015 r., poz. 1277).
24. Dyrektywa Rady 86/278/EWG z dnia 12 czerwca 1986 r. w sprawie ochrony środowiska, w szczególności gleby, w przypadku wykorzystywania osadów ściekowych w rolnictwie.