

Karolina ROSIKOŃ

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii
Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Brzeźnicka 60A, 42-200 Częstochowa
e-mail: k.rosikon@is.pcz.pl

Osady ściekowe w nawożeniu wybranych roślin energetycznych

Nawożenie gleb osadami ściekowymi jest korzystne nie tylko z gospodarczego punktu widzenia, ale także niezbędne do odtwarzania i zachowania równowagi ekologicznej, ponieważ wykorzystanie osadów ściekowych na plantacjach energetycznych pozwala na zamknięcie obiegu składników pokarmowych w całym lokalnym ekosystemie. Zarówno miskant olbrzymi, jak i móżga trzcinowata to rośliny wieloletnie, które dzięki odpowiedniemu nawożeniu posiadają znaczny potencjał produkcyjny, a ich wartość energetyczna jest stosunkowo wysoka. Zastosowanie nawożenia mineralnego (NPK) wiąże się zawsze z dodatkowymi kosztami, które mogą osiągać ponad 40% całkowitych nakładów prowadzenia plantacji, a ponadto może generować dodatkowe problemy ekologiczne. Dlatego stosowanie osadów ściekowych jako źródła składników odżywczych do nawożenia upraw energetycznych jest niewątpliwie korzystne zarówno z punktu widzenia ekologicznego, jak i ekonomicznego.

Słowa kluczowe: osady ściekowe, rośliny energetyczne, nawożenie, remediacja i rekultywacja

Wstęp

Na przestrzeni ostatnich lat obserwuje się w Polsce wzrost liczby oczyszczalni ścieków, a co za tym idzie - ciągły i systematyczny wzrost ilości produkowanych osadów ściekowych [1]. Nadal postrzegane są one jako uciążliwy odpad, co skutkuje brakiem efektywnego ich zagospodarowania. Bogactwo materii organicznej oraz składników pokarmowych zawartych w osadach ściekowych marnotrawione jest najczęściej na składowiskach lub w spalarniach odpadów, które nie do końca rozwiązują problem ich wykorzystania [2]. Zgodnie z przepisami, od 2016 roku składowanie osadów ściekowych będzie niemożliwe, dlatego należy zastanowić się nad innym, bardziej efektywnym sposobem zagospodarowania tego odpadu. Jednym z takich rozwiązań jest wykorzystanie osadów ściekowych w celach remediacyjnych czy rekultywacyjnych [3].

Uprawa roślin energetycznych w warunkach nawożenia osadami ściekowymi łączy w sobie szereg celów zrównoważonego rozwoju gospodarczego, w tym remediację czy rekultywację gruntów zanieczyszczonych. W związku z wyczerpywaniem się konwencjonalnych źródeł energii istnieje potrzeba rozwoju energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych, takich jak biomasa. Aby Polska mogła

wywiązać się z postanowień polityki energetycznej Unii Europejskiej, powinna do 2020 roku zwiększyć produkcję energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych z około 6 do 15%. Grunty wymagające rekultywacji (zdeastowane i zdegradowane, nieużytki) zajmują w Polsce ponad 64 tys. ha. Wynika to w dużej mierze z prowadzonej w Polsce działalności przemysłowej - m.in. przemysłu wydobywczego, energetyki czy przemysłu chemicznego. Z tego względu nie nadają się one pod uprawę roślin przeznaczonych na cele żywnościowe. Dlatego przeznaczenie takich gruntów pod uprawę roślin energetycznych jest niewątpliwie korzystnym kierunkiem ich zagospodarowania, ponieważ rośliny te mogą spełniać rolę zarówno energetyczną, jak i rekultywacyjną [4-6].

Nawożenie gleb osadami ściekowymi pod uprawy energetyczne korzystne jest nie tylko z punktu widzenia ekologicznego, ale i ekonomicznego. Osady ściekowe są doskonałym zamiennikiem dla nawozów mineralnych, które oprócz tego, że mogą generować dodatkowe problemy ekologiczne, pochłaniają także spore koszty inwestycyjne. Według analiz przeprowadzonych przez Matykę [7], koszty nawozów w czasie prowadzenia plantacji miskanta i ślazuca wynoszą ok. 800 zł/ha/rok, co stanowi prawie 40% całości nakładów. Ponadto, produkcja nawozów mineralnych, czy to azotowych czy też fosforowych, jest wysoce energochłonna, co zmniejsza niewątpliwie korzyści energetyczne wynikające z prowadzenia plantacji [2, 6, 8].

Dzięki zagospodarowaniu osadów do celów nawozowych zachowujemy obrót składników pokarmowych, co przyczynia się do zamknięcia ich obiegu w całym lokalnym ekosystemie. Ponadto, rośliny energetyczne cechuje wysokie zapotrzebowanie na składniki pokarmowe, co wraz z niezwykle dużą powierzchnią chłonną ich systemu korzeniowego powoduje, że składniki pokarmowe zawarte w osadach ściekowych zostaną pobrane i nie będą stwarzały problemów środowiskowych, a dość spora powierzchnia systemu korzeniowego sprawia, że ryzyko skażenia wód gruntowych jest minimalne [2, 3].

Dzięki temu, że rośliny energetyczne to rośliny nieprzeznaczone do spożycia ani do produkcji pasz, przedostanie się szkodliwych substancji do łańcucha pokarmowego jest absolutnie minimalne, dlatego stosowanie osadów ściekowych jako odpadu do nawożenia nie niesie za sobą problemów wynikających z ryzyka sanitarnego [8]. Jedynym problemem wynikającym ze stosowania osadów ściekowych w celach nawozowych jest konieczność niezwłocznego wymieszania ich z glebą, co zawęża użycie osadów tylko do momentu orki przed założeniem wieloletniej plantacji [6, 9].

Jednym z głównych ograniczeń w stosowaniu osadów ściekowych jest niewątpliwie skład chemiczny osadów, a mianowicie zwiększona zawartość metali ciężkich, silnie toksycznych związków organicznych czy też organizmów chorobotwórczych. Dlatego osady ściekowe muszą spełniać wymogi określone odpowiednimi przepisami.

1. Uwarunkowania prawne dotyczące wykorzystania osadów ściekowych

Regulacje prawne związane z zagospodarowaniem osadów ściekowych określa Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku oraz Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych [10, 11]. Powyższe akty prawne określają osady ściekowe jako odpad, co potwierdza Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów. Rozporządzenie to klasyfikuje osady ściekowe jako odpady inne niż niebezpieczne o kodzie 19 08 05 [12].

W rozumieniu ustawy o odpadach osady ściekowe to pochodzące z oczyszczalni ścieków osady z komór fermentacyjnych oraz innych instalacji służących do oczyszczania ścieków komunalnych oraz innych ścieków o składzie zbliżonym do składu ścieków komunalnych [13]. Zgodnie z przytoczonymi aktami prawnymi, osady ściekowe mogą być wykorzystywane do następujących celów [10, 11]:

- w rolnictwie, rozumianym jako uprawa wszystkich płodów rolnych wprowadzanych do obrotu handlowego, włączając w to uprawy przeznaczane do produkcji pasz,
- do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu,
- do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz,
- do rekultywacji terenów, w tym gruntów na cele rolne,
- przy dostosowaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu.

Wykorzystanie osadów ściekowych do celów rekultywacyjnych oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia określa rozporządzenie w sprawie komunalnych osadów ściekowych [11]. Rozporządzenie to szczegółowo określa warunki, jakie muszą być spełnione przy wykorzystaniu komunalnych osadów ściekowych, dawki, które można zastosować na gruntach oraz zakres i częstotliwość badań komunalnych osadów ściekowych i gruntów, na których osady mają być stosowane. Podstawowym kryterium przydatności osadów ściekowych do poszczególnych celów jest zawartość metali ciężkich zarówno w osadach, jak i gruntach, na których mają być stosowane, a także ich stan sanitarny.

Komunalne osady ściekowe, zgodnie z wyżej wymienionym rozporządzeniem, mogą być stosowane na cele rekultywacyjne lub do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia, gdy ilość metali ciężkich zawartych w tych osadach nie przekroczy dopuszczalnej wartości określonej w tabeli 1, a w wierzchniej warstwie gruntu, na którym osady te mają być stosowane, nie przekroczy ilości określonych załącznikiem (tab. 2) [11]. Ponadto, rozporządzenie to określa dopuszczalne dawki osadów ściekowych, które mogą być stosowane w ciągu roku, dwóch lub trzech lat na jednostkę powierzchni gruntu [11].

Kolejnym, niezmiernie ważnym parametrem, który decyduje o możliwości wykorzystania osadów ściekowych, jest obecność w nich mikroorganizmów chorobotwórczych. Rozporządzenie podaje, że aby osady ściekowe były dopuszczone do

przyrodniczego wykorzystania, należy poddać je analizie mikrobiologicznej na obecność bakterii z rodzaju *Salmonella* oraz żywych jaj pasożytów jelitowych *Ascaris* sp., *Trichuris* sp., *Toxocara* sp. [11].

Tabela 1. **Dopuszczalna zawartość metali ciężkich w komunalnych osadach ściekowych [11]**

Table 1. **Acceptable content of heavy metals in municipal sewage sludge [11]**

Metale	Zawartość metali ciężkich w mg/kg suchej masy osadu nie większa niż:		
	przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych:		
	w rolnictwie oraz do rekulty- wacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	do uprawy roślin nieprzeznac- zonych do spożycia i produkcji pasz
Kadm (Cd)	20	25	50
Miedź (Cu)	1000	1200	2000
Nikiel (Ni)	300	400	500
Ołów (Pb)	750	1000	1500
Cynk (Zn)	2500	3500	5000
Rtęć (Hg)	16	20	25
Chrom (Cr)	500	1000	2500

Tabela 2. **Wartości dopuszczalne ilości metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu (0÷25 cm) przy stosowaniu komunalnych osadów ściekowych do rekultywacji terenów na cele nierolne oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz [11]**

Table 2. **The limit values of heavy metals in the surface soil layer (0÷25 cm) in the application of sewage sludge to land reclamation for non-agricultural purposes and crops not intended for human consumption and animal feed [11]**

Metale	Wartość dopuszczalna ilości metali ciężkich w mg/kg suchej masy gruntu nie większa niż:		
	przy gruntach:		
	lekkich	średnich	ciężkich
Kadm (Cd)	3	4	5
Miedź (Cu)	50	75	100
Nikiel (Ni)	30	45	60
Ołów (Pb)	50	75	100
Cynk (Zn)	150	220	300
Rtęć (Hg)	1	1,5	2
Chrom (Cr)	100	150	200

2. Wykorzystanie osadów ściekowych w uprawach energetycznych

Osady ściekowe jako mieszanina mikroorganizmów żywych i martwych oraz składników organicznych i mineralnych są doskonałym substratem nawozowym [14, 15]. Użyźnianie gleb substratami pochodzenia osadowego jest zalecane nie tylko z gospodarczego punktu widzenia, lecz także niezbędne jest dla odtwarzania i zachowania równowagi ekologicznej ekosystemu [8].

Bogate w azot, fosfor, mikroelementy oraz łatwo rozkładalną substancję organiczną osady ściekowe uwalniają podczas procesu mineralizacji składniki pokarmowe. Ponadto, osady ściekowe, a dokładniej materia organiczna w nich zawarta, wpływają korzystnie zarówno na fizyczne, chemiczne, jak i mikrobiologiczne właściwości gleb [15, 16]. Szereg badań prowadzonych nad osadami ściekowymi wykazał, że ich skład mineralny i organiczny zbliżony jest do próchnicy glebowej, dlatego też ich stosowanie poprawia strukturę gleby poprzez zwiększenie stopnia infiltracji, stabilność agregatów i pojemność wodną [15, 17]. Dowiedziono również zdolności osadów ściekowych do wiązania metali ciężkich przez zawartą w nich substancję organiczną i nieorganiczną [18]. Jak donoszą badania, jony metali ciężkich zatrzymywane są przez fazę stałą osadów ściekowych za pośrednictwem różnych mechanizmów, takich jak wymiana jonowa, adsorpcja czy strącanie [15, 19]. Mimo tak wielu zalet, jakimi charakteryzują się osady ściekowe, nadal spora ich ilość jest nieodpowiednio wykorzystana.

Nawożenie osadami roślin energetycznych to jeden z bezpieczniejszych i efektywnych sposobów ich zagospodarowania. Nawozowe wykorzystanie osadów ściekowych jest uzasadnione przyrodniczo i powinno być popierane wszędzie tam, gdzie brak jednoznacznych przeciwwskazań. Z uwagi na fakt, że rośliny energetyczne należą do roślin przemysłowych niekonsumpcyjnych, ryzyko przedostania się szkodliwych substancji do łańcucha pokarmowego jest stosunkowo minimalne [6, 8].

2.1. Wpływ osadów ściekowych na biomasę

Spośród wielu gatunków roślin energetycznych najodpowiedniejsze do uprawy z wykorzystaniem osadów ściekowych wydają się rośliny energetyczne wieloletnie, takie jak miskant olbrzymi czy mozga trzciniowa, także wierzba, topola, spartina, róża i in. [2]. Przy odpowiednim nawożeniu, jakie niewątpliwie zapewniają osady ściekowe, rośliny te mają zdolność do wysokiego plonowania i posiadają stosunkowo wysoką wartość opałową, co potwierdzają liczni autorzy [20-24]. Badania dowodzą, że najlepiej na rozwój i wzrost roślin oddziałują azot, fosfor i potas. Doskonałym źródłem tych pierwiastków, szczególnie azotu i fosforu, są właśnie osady ściekowe wykorzystywane do nawożenia upraw energetycznych (potasu w osadach ściekowych jest zbyt mało, aby mógł on zaspokoić wymagania pokarmowe roślin energetycznych, dlatego należy stosować go w formie mineralnej po uprzednim uwzględnieniu zasobności gleby w ten składnik). Ponadto, wzrost roślin zależy w dużej mierze od zastosowanej dawki nawożenia organicznego. Ociepa [25] w swoich badaniach dowiodła, iż dawka osadów wynosząca

40 t/ha jest najodpowiedniejsza przy nawożeniu roślin. Pozwoliła ona na uzyskanie 2-3-krotnie wyższego plonu biomasy w porównaniu z kontrolą. Jednak dawka osadów ściekowych nie jest najistotniejszym aspektem - równie ważny jest także wpływ rodzaju osadu oraz stopnia rozkładu materii organicznej na plonowanie roślin [23, 26]. Należy także zwrócić uwagę na zawartość w osadach metali ciężkich, ponieważ ich ilość, zdefiniowana prawnie, może zdyskwalifikować je do przyrodniczego wykorzystania. Wykazano, że nadmierne zanieczyszczenie osadów ściekowych metalami ciężkimi może być czynnikiem silnie ograniczającym przyrost biomasy [6, 27]. Nawet jeżeli w pierwszym roku uprawy z zastosowaniem osadów ściekowych plon biomasy jest wysoki, to z reguły w kolejnych latach pojawiają się objawy toksyczności oraz stopniowo zmniejsza się plonowanie. Dlatego też stosowanie silnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi osadów ściekowych w celach nawozowych mija się z celem [6, 28].

Konsekwencją stosowania osadów ściekowych powinny być również zmiany w jakości biomasy (tj. w składzie chemicznym roślin), jednak, jak pokazują badania, zmiany te były nieznaczne. Wykazano, że składniki pokarmowe zawarte w osadach ściekowych w stosunkowo małym stopniu oddziałują na skład chemiczny roślin [29].

Istotnym faktem w nawożeniu gleb osadami ściekowymi w uprawach energetycznych jest to, że wpływają one nie tylko na przyrost biomasy, ale także przyczyniają się do rozwinięcia systemu korzeniowego uprawianych roślin - rośliny uprawiane na osadach ściekowych wykształcają większą liczbę korzeni niż na glebie nienawożonej lub nawożonej mineralnie [30, 31].

2.2. Wpływ osadów ściekowych na wartość opałową roślin

Wzrost wysokości plonów i ich jakości ze względu na nakłady energii jest bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia korzyści ekonomicznych prowadzenia plantacji roślin na cele energetyczne. Uprawa tych roślin ma sens wówczas, gdy nakłady energii na ich uprawę są znacznie niższe od energii z nich uzyskiwanej [25]. Dlatego też bardzo ważnym aspektem jest wpływ nawożenia na podstawowe właściwości energetyczne roślin, przede wszystkim na wartość opałową.

Wprowadzenie nawożenia organicznego w uprawach energetycznych z reguły wpływa korzystnie na ich właściwości energetyczne. Zarówno stosowanie osadów ściekowych, jak i kompostów zdecydowanie poprawia jakość biomasy pod względem energetycznym. Kalembasa i Malinowska [32] w swoich badaniach odnotowały korzystny wpływ osadów ściekowych na wartość opałową miskanta dopiero w II roku prowadzenia doświadczenia i wyniosła ona średnio 16,87 MJ/kg s.m. Jednak pojawiają się także badania, które wykazują, że wpływ na wartość opałową roślin energetycznych ma także pochodzenie osadów ściekowych, czy to z oczyszczalni przemysłowej czy komunalnej. Kacprzak i Rosikoń [33] w badaniach nad wykorzystaniem osadów ściekowych do nawożenia miskanta olbrzymiego i mozgi trzcinowatej odnotowały, że w przypadku mozgi trzcinowatej zastosowanie osadów przemysłowych wpływa korzystnie na jej wartość opałową, która wyniosła

14,76 MJ/kg s.m., niż w przypadku stosowania osadów komunalnych (13,73 MJ/kg s.m.).

Bardzo znaczący wpływ na wartość opałową obok nawożenia ma wilgotność roślin, która z kolei wynika w dużej mierze z terminu zbioru - im niższa wilgotność biomasy, tym wyższa wartość opałowa [34, 35]. Stolarski i inni [35] odnotowali, że termin zbioru (wiosenny czy jesienny), a co za tym idzie - wilgotność biomasy wpływają na średnio 2-krotne zwiększenie wartości opałowej miskanta olbrzymiego. Przy wilgotności ok. 55% (jesień) wartość opałowa miskanta wyniosła ok. 12,5 MJ/kg s.m., z kolei wilgotność ok. 25% (wiosna) pozwoliła na uzyskanie wartości opałowej na poziomie ok. 7,5 MJ/kg s.m.

2.3. Wpływ osadów ściekowych na pobieranie i magazynowanie pierwiastków (szczególnie metali ciężkich) w częściach nadziemnych

Rośliny energetyczne akumulują przeciętne ilości metali w tkankach, ale całkowite pobranie metali w ogromnym plonie biomasy może być porównywalne lub nawet wyższe niż efekt działania roślin hiperakumulujących [6].

Stosowanie osadów ściekowych powoduje zakwaszenie gleby i zwiększenie biodostępności metali [36, 37]. Badania dowodzą, że nawożenie gleb osadami ściekowymi zwiększa intensywność pobierania metali przez biomasę miskanta cukrowego nawet w III i częściowo w IV roku uprawy [37, 38]. Badania Kalembasy i Malinowskiej [38] wskazują, że zastosowanie osadów ściekowych w uprawie miskanta wpłynęło na 3-krotne zwiększenie pobierania Ni, 2-krotne zwiększenie pobierania Cr i Cu oraz zwiększenie pobierania Zn i Cd w III roku prowadzenia doświadczenia. Intensywne pobieranie pierwiastków śladowych z gleby i ich akumulacja w biomacie roślin energetycznych stwarzają jednocześnie nowe problemy techniczne i środowiskowe. Pozostałości po procesach spalania lub innego przerozu biomasy mogą zawierać znaczne ilości metali, co kwalifikuje je do grupy odpadów niebezpiecznych dla środowiska. Jako tzw. biorudy powinny być kierowane do zakładów przerabiających rudy metali celem uniknięcia deponowania na zwykłych składowiskach popiołów energetycznych [6, 13, 39].

Poza tym w literaturze znaleźć można informacje, że pod wpływem nawożenia osadami ściekowymi w częściach nadziemnych - w liściach w największych ilościach kumulowane są Fe, Mn, B, Li i Ti, z kolei łodygi miskanta najchętniej pobierają Mo i Sr. Ponadto, stwierdzono, że pobranie i wyniesienie badanych pierwiastków z plonem miskanta jest ściśle związane z rokiem uprawy, a mianowicie w I roku zaobserwowano, że zdolność miskanta do pobierania metali jest większa niż w II roku uprawy [40].

Krzywy-Gawrońska [41] w badaniach nad oddziaływaniem kompostu z osadów ściekowych oraz odpadów paleniskowych na jakość biomasy miskanta udowodnia, że średnia zawartość metali ciężkich (Cd, Mn, Cu, Ni, Pb i Zn) w roślinie była wyższa po nawożeniu uprawy kompostem z osadów ściekowych niż po zastosowaniu odpadów paleniskowych (popiołów). Dowodzi to, że stosowanie osadów ście-

kowych pod uprawy energetyczne wpływa korzystnie na pobieranie metali ciężkich z gleby.

Podsumowanie

Na podstawie dostępnej literatury stwierdzono, że osady ściekowe wpływają korzystnie zarówno na glebę, jak i rośliny. Stosowanie osadów ściekowych do nawożenia upraw energetycznych, w celu zachowania intensywnego wzrostu roślin, skutecznie zastępuje wykorzystanie nawozów mineralnych, co jest niewątpliwie korzystne ze względu ekologicznego oraz ekonomicznego. Gleby zdegradowane poddawane procesom remediacji cechują się na ogół wadliwym uziarnieniem, brakiem właściwej struktury, wadliwymi stosunkami powietrzno-wodnymi oraz niedostatkiem próchnicy i składników pokarmowych dla roślin. Biorąc pod uwagę skład osadów ściekowych, mogą one być z powodzeniem stosowane zarówno w procesach remediacji, jak i rekultywacji gleb jako skuteczny sposób odtworzenia i poprawy fizykochemicznych właściwości gleb.

Dodatkowo, przyrodnicze wykorzystanie osadów ściekowych jest ważnym elementem systemu zagospodarowania tego odpadu, którego ilość z roku na rok będzie wzrastać, tak jak rośnie liczba powstających oczyszczalni ścieków.

Podziękowania

Praca finansowana w ramach badań statutowych BS/MN-401-317/11. Autorka Karolina Rosikoń w latach 2011-2013 była stypendystką programu DoktoRIS - Program Stypendialny na rzecz innowacyjnego Śląska współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- [1] Bień J., Neczaj E., Worwąg M., Grosser A., Nowak D., Milczarek M., Janik M., Kierunki zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce po roku 2013, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2011, 14(4), 375-384.
- [2] Klasa A., Uprawa wierzby energetycznej jako działalność o charakterze pośrodkowym, na przykładzie wykorzystania osadów ściekowych do nawożenia, 2009, www.drewno.pl
- [3] Kaźmierczak U., Milian A., Komunalne osady ściekowe jako alternatywa gleby w rekultywacji, [w:] *Kompostowanie i mechaniczno-biologiczne przetwarzanie odpadów*, red. G. Siemiątkowski, Opole 2011.
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych, DzU UE L 09.140.16.
- [5] *Ochrona Środowiska 2013*, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2013.
- [6] Kabała C., Karczewska A., Kozak M., Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu* 2010, Rolnictwo XCVI, 576, 97-118.
- [7] Matyka M., Oplacalność i konkurencyjność produkcji wybranych roślin energetycznych, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2008, zeszyt 11.

- [8] Ociepa-Kubicka A., Pachura P., Wykorzystanie osadów ściekowych i kompostu w nawożeniu roślin energetycznych na przykładzie miskanta i ślázowca, *Annual Set the Environment Protection* 2013, 15, 2267-2278.
- [9] Faber A., Kuś J., Matyka M., Uprawa roślin na potrzeby energetyki, PKPP Lewiatan, Vattenfall AB, Warszawa 2008.
- [10] Ustawa o odpadach z dnia 14 grudnia 2012 roku, DzU 2013, poz. 21.
- [11] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych, DzU 2010, Nr 137, poz. 924.
- [12] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 roku w sprawie katalogu odpadów, DzU 2001, Nr 112, poz. 1206.
- [13] Rybak W., Spalanie i współspalanie biopaliw stałych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2006.
- [14] Bień J., Osady ściekowe. Teoria i praktyka, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [15] Nowak M., Kacprzak M., Grobelak A., Osady ściekowe jako substytut glebowy w procesach remediacji i rekultywacji terenów skażonych metalami ciężkimi, *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 2010, 13(2), 121-131.
- [16] Gasco G., Martinez-Inigo M., Lobo M., Soil organic matter transformation after a sewage sludge application, *EJEAFChE* 2004, 3, 716-722.
- [17] Obbard J., Ecotoxicological assessment of heavy metals in sewage sludge amended soils, *Applied Geochemistry* 2001, 16, 1405-1411.
- [18] Wilk M., Gworek B., Metale ciężkie w osadach ściekowych, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2009, 39.
- [19] Karczewska A., Metale ciężkie w glebach zanieczyszczonych emisjami hut miedzi - formy i rozpuszczalność, *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu* 2002, 432.
- [20] Kalembasa S., Symanowicz B., Kalembasa D., Malinowska L., Możliwości pozyskiwania i przeróbki biomasy z roślin szybko rosnących (energetycznych), *Mat. Konf. Nowe spojrzenie na osady ściekowe*, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2003, 358-364.
- [21] Kalembasa D., Malinowska E., Działania następcze osadu ściekowego zastosowanego do gleby w doświadczeniu wazonowym na zawartość metali ciężkich w trawie *Miscanthus sacchariflorus*, *Acta Agrophysica* 2009, 13(2), 377-384.
- [22] Kalembasa D., Malinowska E., The yield and content of trace elements in biomass of *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack. and in soil in the third year of a pot experiment, *J. Elementol.* 2009, 14(4), 685-691.
- [23] Krzywy E., Iżewska A., Jeżowski S., Ocena możliwości wykorzystania komunalnego osadu ściekowego do nawożenia trzciny chińskiej (*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack.), *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 2003, 494, 225-232.
- [24] Krzywy E., Iżewska A., Wołoszyk C., Bezpośredni i następczy efekt osadów ze ścieków komunalnych oraz kompostów z osadów na plon i zawartość mikroelementów w słomie *Miscanthus sacchariflorus*, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 2004, 502, 865-875.
- [25] Ociepa A., Wpływ nawożenia na właściwości fitoremediacyjne i energetyczne wybranych gatunków roślin, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2010.
- [26] Iżewska A., Zawartość metali ciężkich w *Miscanthus sacchariflorus* jako wskaźnik użyteczności osadów ściekowych i kompostów z osadów, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 2006, 512, 165-171.
- [27] Borkowska H., Jackowska I., Piotrowski J., Styk B., Suitability of cultivation of some perennial plant species on sewage sludge, *Polish J. Environ. Studies* 2001, 10(5), 379-381.
- [28] Kozak M., Kotecki A., Dobrzański Z., The *Miscanthus giganteus* response to chemical contamination of soil, [w:] *Chemistry and biochemistry in the agricultural production and environment protection*, ed. H. Górecki, Czech-Pol-Trade, Prague 2006, 520-524.
- [29] Jakubus M., Ocena przydatności osadów ściekowych w nawożeniu roślin, *Woda - Środowisko - Obszary Wiejskie* 2006, 6, 2(18), 87-97.

- [30] Antonkiewicz J., Jasiewicz C., Następczy wpływ chemicznego zanieczyszczenia gleby na zawartość metali ciężkich w śłazowcu pensylwańskim, [w:] Obieg pierwiastków w przyrodzie, IOŚ, Monografia, 2005, 3, 290-297.
- [31] Kalembasa D., Malinowska E., Skład chemiczny i plon biomasy wybranych klonów trawy *Miscanthus*, [w:] Obieg pierwiastków w przyrodzie, IOŚ, Monografia, 2005, 3, 315-318.
- [32] Kalembasa D., Malinowska E., Wpływ dawek osadu ściekowego na plon biomasy trawy *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack., zawartość siarki oraz wartość energetyczną, Zeszyty Probl. Post. Nauk Rol. 2008, 533, 173-179.
- [33] Kacprzak M., Rosikoń K., The energetic value of selected plants growing on degraded soil fertilized by sewage sludge, *Archivum Combustionis* 2012, 32(3-4), 123-129.
- [34] Dłużniewska J., Jaworska M., Biomass for energy - potential and limitations, *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 2007, 9, 919-925.
- [35] Stolarski M., Szczurowski S., Tworkowski J., Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych, *Energetyka i Ekologia* 2008, 1, 77-80.
- [36] Kabata-Pendias A., Pendias A., Trace Elements in Soils and Plants, Third Edition, CRC Press, New York 2001.
- [37] Kacprzak M., Fitoremediacja gleb skażonych metalami ciężkimi, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013.
- [38] Kalembasa D., Malinowska E., Działanie osadu ściekowego na zawartość metali ciężkich w biomacie trawy *Miscanthus sacchariflorus* oraz w glebie, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 2010, 42, 198-203.
- [39] Ghosh M., Singh S.P., A review of phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products, *Applied Ecology and Environmental Research* 2005, 3(1), 1-18.
- [40] Malinowska E., Kalembasa D., Content of selected elements in *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack. biomass under the influence of sewage sludge fertilization, *Ecological Chemistry and Engineering* 2013, 20, 2.
- [41] Krzywy-Gawrońska E., Evaluation of the effect of municipal sewage sludge compost and furnace waste on the quality of amur silver grass *Miscanthus sacchariflorus* biomass, *Ecological Chemistry and Engineering* 2013, 20(2), 303-320.

Sewage Sludge in Fertilization of Selected Energy Crops

Soil fertilization with sewage sludge is preferred not only from economical point of view, but also considered necessary for the reproduction and preservation of ecological balance, because the use of sewage sludge for energy plantations can provide closed circulation of nutrients throughout the local ecosystem. Both giant miscanthus and reed canary grass are perennial plants, which by proper fertilization have significant production potential and their energy value is relatively high. The use of mineral fertilizers (NPK) always involves additional costs, which can reach more than 40% of the total plantation outlays and moreover, can generate additional environmental problems. Therefore, the use of sewage sludge as a source of nutrients for crop fertilization energy is undoubtedly beneficial both from the point of view of the ecological and economic reasons.

Keywords: sewage sludge, energy crops, fertilization, remediation and reclamation