

KRZYSZTOF KLIMONT
ZOFIA BULIŃSKA-RADOMSKA
AGNIESZKA OSIŃSKA
PIOTR BAJOR

Krajowe Centrum Roślinnych Zasobów Genowych
Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — PIB w Radzikowie

Kształtowanie się składu gatunkowego roślin wprowadzanych i spontanicznie zasiedlających użyźniane składowisko odpadów komunalnych

Formation of species composition of plants introduced and spontaneously settled on a fertilized municipal waste dump

W latach 2010–2012 badano gatunki traw i roślin motylkowatych przydatnych do rekultywacji biologicznej składowiska odpadów komunalnych pokrytych popiołem paleniskowym i użyźnionych osadem ścieków komunalnych, jak również ich glebotwórcze działanie. Rekultywacyjne pokrycie wysypiska odpadów komunalnych warstwą popiołów i osadów ścieków komunalnych stworzyło warunki do intensywnej wegetacji roślin oraz inicjacji procesu glebotwórczego. Na zreaktywowanym gruncie najlepiej z każdym rokiem rozwijała się kupkówka pospolita i stokłosa bezostna, następnie kostrzewa łąkowa, której udział w poroście systematycznie maleje, podobnie jak mozgi trzcinowatej, życicy trwałej i tymotki łąkowej. Po okresie słabszego rozwoju wzrasta udział w poroście perzu grzebieniastego i wydmuchrzycy groniastej. Na składowisku pojawiły się bardzo liczne gatunki sukcesji spontanicznej. Osady ściekowe wraz z porastającą roślinnością gromadzą materię organiczną oraz składniki pokarmowe, zwiększając wodochłonność i buforują odczyn. Osadowe użyźnienie popiołowej warstwy na składowisku odpadów komunalnych zwiększyło zawartość metali ciężkich w powierzchniowej warstwie zreaktywowanego gruntu, ale nie miało to znaczącego wpływu na zawartość tych składników w roślinach.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, popioły paleniskowe, osady ściekowe, rekultywacja, rośliny, rozwój gleby

In years 2011–2012 we tested grass and legume plants species suitable for biological reclamation and their soil-forming effect on municipal waste stockyards covered by furnace ash and enriched with municipal waste sediment. Reclamation cover of municipal waste stockyard with soil forming layer of ashes and municipal waste sediment created conditions for intensive plant vegetation and initiation of soil-forming process. On reclaimed land each year *Dactylis glomerata* and *Bromus inermis* were developing best, then *Festuca pratensis*, that systematically decreased in share similarly to *Phalaris*

arundinacea, *Lolium perenne* and *Phleum pratense*. After period of weaker expansion, increases in the shares of *Agropyron cristatum* and *Leymus racemosus* in the growth were noted. Very numerous species of spontaneous succession appeared on the stockyard. Sewage sludge, together with growing vegetation, gathered organic matter and nutrients, increased moisture capacity and buffered soil pH. Fertilization of ash layer on municipal waste stockyard increased the content of heavy metals in the surface layer of the reclaimed soil, but did not influence significantly the contents of these components in plants.

Key words: heavy metals, ashes, sewage sediment, land reclamation, plants, soil evolution

WSTĘP

Składowiska odpadów komunalnych stanowią potencjalne zagrożenie jakości wód podziemnych, emitują też do atmosfery gaz wysypiskowy (głównie metan i siarkowodór). Konieczna jest ich rekultywacja (Siuta, 2004; Kasprzyk, 2011).

Odpady paleniskowe energetyki węglowej, wykazujące podobieństwo składu chemicznego do gliniastych (ilastych) utworów czwartorzędowych w Polsce mogą być z powodzeniem wykorzystane do pokrycia wysypisk odpadów glebotwórczą warstwą popiołu wzbogaconą powierzchniowo ziemią piaskowo-gliniastą lub osadem ścieków komunalnych, a potem obsiana mieszanką traw i roślin motylkowatych (Siuta, 2004; Siuta, Kutla, 2005). Wartość glebotwórcza popiołów paleniskowych jest bardzo duża, ponieważ zawierają one w zasadzie wszystkie składniki pokarmowe, oprócz azotu, niezbędne dla wzrostu i rozwoju roślin. Wprowadzenie do popiołów masy organicznej w postaci osadów z biologicznego oczyszczalnika ścieków komunalnych i wymieszanie ich z podłożem tworzy warunki do dynamicznego rozwoju procesu glebotwórczego i intensywnego zazieleniania powierzchni (Góral, Rola, 2001; Klimont, Bulińska-Radomska, 2009). Popiół paleniskowy z elektrociepłowni może być z powodzeniem stosowany do pokrycia powierzchni składowiska odpadów bytowych jako podłoże do rekultywacji biologicznej z wykorzystaniem wybranych gatunków roślin (Klimont, 2005; Klimont, Bulińska-Radomska, 2010).

Celem badań, których wyniki przedstawiono w niniejszej publikacji, było określenie gatunków roślin przydatnych do rekultywacji biologicznej składowiska odpadów komunalnych pokrytych popiołem użyźnionym osadem ściekowym oraz ich glebotwórcze oddziaływanie.

MATERIAŁ I METODY

Doświadczenie założono na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Uhowie (gm. Łapy) koło Białegostoku na powierzchni 4,0 ha. Odpady komunalne gromadzono od połowy lat 70. do zamknięcia w 2003 roku. Po wyrównaniu powierzchni składowiska pokryto ją warstwą popiołu węgla kamiennego z elektrociepłowni w Białymstoku o miąższości około 1 m. Wiosną 2004 roku popioły wzbogacono dawką 300 t·ha⁻¹ osadu ściekowego zawierającego 20% s.m. i wymieszano ze złożem broną talerzową, wyrównano broną lekką i wałowano ciężkim wałem łąkowym, a następnie wniesiono 135 kg NPK·ha⁻¹ w formie polifoski. Na przygotowaną powierzchnię wysiano specjalnie

przygotowaną mieszankę traw z roślinami motylkowatymi drobnonasiennymi stosując jako roślinę ochronną gorczycę jasną. Wysiano następujące gatunki roślin uwzględniając ich procentowy udział nasion w mieszance: kupkówka pospolita (*Dactylis glomerata* L.) — 22,8%, nostryk biały (*Melilotus albus* Medik.) — 14,1%, kostrzewa łąkowa (*Festuca pratensis* Huds.) — 11,3%, stokłosa bezostna (*Bromus inermis* Leyss.) — 9,4%, koniczyna łąkowa (*Trifolium pratense* L.) — 8,5%, wydmuchrzyca groniasta (*Leymus racemosus* (Lam.) Tzvel.) — 9,4%, perz grzebieniasty (*Agropyron cristatum* (L.) Gaerth.) — 7,5%, życica trwała (*Lolium perenne* L.) — 7,5%, mozga trzciniowa (*Phalaris arundinacea* L.) — 4,7%, tymotka łąkowa (*Phleum pratense* L.) — 4,7%. W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki uzyskane w latach 2010–2012, gdzie oceniano stan porostu, jego bujność i skład botaniczny, a także wzrost i rozwój mieszanki traw z motylkowatymi pod kątem ich przydatności do rekultywacji składowisk odpadów komunalnych pokrytych warstwą popiołów paleniskowych i użyźnionych osadem ścieków komunalnych.

Rejestrowano zmiany składu botanicznego w kolejnych latach badań. Corocznie w okresie dojrzałości pełnej ziarniaków dominujących gatunków traw, celem ułatwienia samosiewów ruń przykaszano. Określano również wpływ osadów ściekowych wprowadzonych do bezglebowego podłoża popiołów paleniskowych i porastającej je roślinności, na gromadzenie składników pokarmowych i zmiany odczynu poprzez analizy pobranych próbek wykonane w akredytowanym laboratorium Okręgowej Stacji Chemiczno-Rolniczej w Kielcach. W próbkach popiołowej pokrywy oznaczono zawartość materii organicznej metodą Tiurina, oraz pH metodą potencjometryczną, zawartości w złożu i materiale roślinnym P metodą spektrofotometryczną, K metodą fotometrii płomieniowej i Mg metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej, tą samą metodą oznaczono Cu w roślinach. Zawartość metali ciężkich Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, As zarówno w podłożu, jak i materiale roślinnym metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej (FAAS), a Hg metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej z amalgamacją par rtęci. Obliczeń statystycznych dokonano metodą analizy wariancji poprzez syntezę wyników z lat badań, natomiast różnicę między średnimi oceniano metodą Tukeya przy $NIR\alpha = 0,05$.

WYNIKI I DYSKUSJA

Warunki pogodowe w latach badań były zróżnicowane i wyraźnie wpływały na rozwój i wartość ocenianych cech roślinności porastającej zrehabilitowane tereny (tab. 1, 2).

Pierwszy rok badań (2010) charakteryzował się obfitą w opady wiosną, a także ciepłym i deszczowym latem — warunki te były najkorzystniejsze do wegetacji roślin. Drugi (2011) i trzeci (2012) rok badań był również korzystny dla rozwoju roślin ze względu na dostatek opadów w okresie wiosennym i letnim, przy sprzyjających temperaturach w tym czasie. Suma opadów w roku 2010 była rekordowa i wynosiła 787,3 mm, w roku 2011 — 599,6 mm, w roku 2012 — 601,0 mm, przy średniej z wielolecia 1969–2010 — 599,2 mm. Średnia temperatura powietrza w 2010 roku wynosiła 6,8°C, w 2011 — 7,8°C, a w 2012 — 7,4°C, podczas gdy średnia z wielolecia 1969–2005 wynosiła 6,6°C.

Tabela 1

Suma opadów miesięcznych oraz średnia miesięczna temperatura powietrza w latach 2010–2012
Sums of monthly rainfall and monthly average of air temperature in years 2010–2012

Miesiąc Month	Lata — Years							
	1969-2010	1969–2005	2010		2011		2012	
	suma opadów sum of rainfall (mm)	temp. (°C)	suma opadów sum of rainfall (mm)	temp. (°C)	suma opadów sum of rainfall (mm)	temp. (°C)	suma opadów sum of rainfall (mm)	temp. (°C)
Styczeń January	29,1	-4,5	25,0	-10,5	27,0	-2,1	45,7	-2,5
Luty February	30,0	-3,8	29,0	-3,5	25,7	-6,2	23,3	-8,7
Marzec March	34,3	0,4	28,6	1,9	14,3	0,8	16,3	2,8
Kwiecień April	34,3	6,5	33,0	8,0	40,7	9,2	42,2	8,1
Maj May	56,2	12,6	132,7	13,6	60,3	13,2	54,6	13,9
Czerwiec June	70,5	15,7	77,0	17,1	55,3	17,8	108,3	15,7
Lipiec July	84,4	17,1	110,7	21,3	231,3	18,5	101,0	19,7
Sierpień August	70,9	16,3	118,0	19,4	67,0	17,6	87,3	17,2
Wrzesień September	53,8	12,0	105,7	11,5	18,7	13,7	32,2	13,2
Październik October	49,0	7,0	17,0	4,4	18,6	6,6	25,5	6,1
Listopad November	42,9	1,8	70,3	4,5	12,0	2,2	17,3	3,3
Grudzień December	43,8	-2,3	40,3	-6,4	28,7	1,8	28,8	1,0
RO	599,2	6,6	787,3	6,8	599,6	7,8	582,5	7,4

RO — roczna suma opadów i średnia roczna temperatura powietrza; Annual sum of rainfall and average air temperature
 * wg Wyniki doświadczeń terenowych województwa podlaskiego za lata 2010–2012. PODR Szepietowo 2012

Pośród ocenianych gatunków traw i roślin motylkowatych zastosowanych do obsiewu powierzchni składowiska odpadów komunalnych pokrytych popiołem paleniskowym wzbogaconym osadem ściekowym, największy procentowy udział w poroście wykazała kupkówka pospolita (64,3%) przy bujności rzędu 8,7° w 10-stopniowej skali. Świadczy to o dużych zdolnościach pionierskich, trwałości i wytrzymałości tego gatunku na niesprzyjające warunki środowiska (tab. 2). Nadal dobrze rośnie kostrzewa łąkowa utrzymując średnio 10% udziału w poroście, chociaż widoczny jest tu spadek w kolejnych latach badań. Bujność tego gatunku jest także wysoka i wynosi średnio 7,3°. Bardzo dobrze rośnie też stokłosa bezostna, której udział w poroście wynosił średnio wprawdzie tylko 6,3%, ale wykazuje tendencję wzrastającą w stosunku do lat ubiegłych, ponadto cechuje się wysoką bujnością 8,3°.

Tabela 2

Skład botaniczny oraz ocena rozwoju roślin zastosowanych do rekultywacji składowiska odpadów komunalnych pokrytych popiołem paleniskowym użyźnionym osadem ściekowym (2010-2012)
Botanical composition and evaluation of plants applied for the reclamation of municipal sewage stockyards covered by furnace ashes enriched with sewage sludge (2010-2012)

Lp. No.	Gatunek rośliny Plant species	Udział w poroście Share in growth (%)				Bujność roślin Plant luxuriance (0–9°)			
		2010	2011	2012	średnio mean	2010	2011	2012	średnio mean
1	<i>Dactylis glomerata</i> L.	62	64	67	64,3	9	8	9	8,7
2	<i>Festuca pratensis</i> Huds.	11	10	9	10,0	8	7	7	7,3
3	<i>Bromus inermis</i> Leyss.	6	6	7	6,3	9	8	8	8,3
4	<i>Phalaris arundinacea</i> L.	4	3	3	3,3	6	6	6	6,0
5	<i>Lolium perenne</i> L.	3	2	2	2,3	5	6	5	5,3
6	<i>Trifolium pratense</i> L.	3	2	1	2,0	5	5	5	5,0
7	<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaerth.	2	3	4	3,0	5	5	5	6,0
8	<i>Leymus racemosus</i> (Lam.) Tzvel.	2	3	4	3,0	4	5	5	5,7
9	<i>Phleum pratense</i> L.	0,8	0,5	0,5	0,6	3	2	3	2,7
10	<i>Melilotus albus</i> Medik.	0,1	0,1	0,1	0,1	2	2	2	2,0

0° — brak roślin

0° — no survival

9° — rośliny bujne (gęsto, równomiernie i obficie porastające podłoże)

9° — luxuriant plants (growing on the substrate densely, uniformly and in abundance)

Gorzej w stosunku do lat ubiegłych wegetowały mozga trzcinowata i życica trwała uzyskując odpowiednio 3,3 i 2,3% udziału w runi i bujność 6,0 oraz 5,3°. Oceniane gatunki pochodzące z innych rejonów świata, tj. perz grzebieniasty i wydmuchrzyca groniasta, po okresie słabszego rozwoju w początkowym okresie rozwijały się intensywniej, stanowiąc równo po 3% porostu przy bujności odpowiednio 6,0 i 5,7°. Wśród roślin motylkowatych bardziej przydatna okazała się koniczyna łąkowa stanowiąca 2% porostu i uzyskująca bujność 5,0°, podczas gdy nostrzyk zaledwie 0,1% udziału przy bujności 2,0°. Koniczyna łąkowa okazała się jednak mało przydatna do rekultywacji popiołów paleniskowych, ponieważ gatunek ten ma duże wymagania co do żyzności i kultury gleby, a na popiele rozwija się słabo już od pierwszych lat wegetacji i jego udział w poroście systematycznie maleje, ponieważ nie wytrzymuje silnej konkurencji ze strony traw, szczególnie tych wysokich, co wykazano w wielu pracach (Prończuk 1994; Góral, Rola, 2001; Klimont, Bulińska-Radomska 2009, 2010; Majtkowski, Majtkowska, 2012). Z kolei nostrzyk biały jako roślina krótkotrwała w zasadzie może być zastosowany jako wsiewka w inne wieloletnie rośliny i dlatego po kilku latach od wysiewu odnotowano tylko jego niewielki udział w runi, który nie zmienił się od czasu poprzednich badań (Jabłoński 2000; Klimont, Bulińska-Radomska, 2010). Góral (2001) zaleca wykorzystanie innych wieloletnich roślin motylkowatych, w tym koniczynę łąkową i dwuletnie formy nostrzyku białego do obsiewu składowisk popiołów paleniskowych i zwałowisk ziemi przy kopalniach ze względu na wysokie pH tego podłoża, zasobność w wapń i inne składniki pokarmowe, a deficytowy azot rośliny mogą czerpać z powietrza. Wyniki trzyletnich badań wskazują, że w runi dominuje kupkówka pospolita, której udział z każdym rokiem systematycznie wzrastał, w porównaniu do udziału w zastosowanej do obsiewu mieszance oraz poprzednich trzyletnich badań i wynosił średnio 64,3% (Klimont, Bulińska-Radomska, 2010). Następne

miejsce zajmuje kostrzewa łąkowa z 10% udziałem, który w zasadzie nie uległ zmianie od początku badań, ale wyraźnie wzrósł udział stokłosa bezostnej a zmalał mozgi trzcinowatej i życicy trwałej. Wydmuchrzyca groniasta i perz grzebieniasty — gatunki obcego pochodzenia — po okresie słabszego rozwoju w pierwszych latach wegetacji zwiększyły swój udział w runi, wykazały się wielką bujnością oraz stały się konkurencyjne dla gatunków rodzimych. Z tego względu wydają się przydatne i polecane do rekultywacji tego typu składowisk, co jest zgodne z charakterystyką tych gatunków (Majtkowski i in. 1996) i wynikami Klimonta i Bulińskiej-Radomskiej (2009) oraz Majtkowskiego i Majtkowskiej (2012) uzyskanymi przy biologicznej rekultywacji hałdy popiołów. Góral (2001) zdecydowanie poleca kupkówkę pospolitą do rekultywacji terenu składowiska popiołów nawiezionych wysokimi dawkami osadów ściekowych oraz stokłosę bezostną ze względu na dużą odporność na suszę oraz zdolność rozmnażania się przez rozłogi. Mozga trzcinowata z silnym systemem korzeniowym trwała ale znosząca tylko przejściowe okresy suszy, tymotka łąkowa ze względu na duże wymagania w stosunku do kultury gleby i słabą zdolność konkurencyjną, oraz życica trwała wymagająca gleb żyznych i wilgotnych wyraźnie ograniczyły swój udział w runi i w mniejszym stopniu nadają się do celów rekultywacyjnych, co potwierdzają wyniki niniejszego doświadczenia. Rezultaty badań Górala i Roli (2001), Klimonta (2004), Pawluśkiewicza i Gutowskiej (2005), Klimonta i Bulińskiej-Radomskiej (2009, 2010) oraz Majtkowskiego i Majtkowskiej (2012) wskazują na szczególną przydatność traw do rekultywacji składowisk odpadów komunalnych.

Na powierzchni składowiska, tam gdzie ustępuje zwarta darń roślinności trawiastej, wkraczają inne gatunki roślin — obserwuje się również niewielkie skupiska pokrzywy zwyczajnej, które co roku się powiększają. Pojawiły się także rośliny jednoroczne: gwiazdnica pospolita, starzec zwyczajny, maruna bezwonna, bodziszek porożcinany przytulia czepna, tasznik pospolity i komosa biała oraz wieloletnie: szczaw zwyczajny i polny, babka zwyczajna i lancetowata, krwawnik pospolity, mniszek lekarski, mlecz polny, ostrożeń pospolity i bylica pospolita. Na zboczach składowiska o mniejszym uwilgotnieniu wyrosły: koniczyna biała, komonica różkowa, łopian mniejszy i większy, podbiał pospolity, bylica piołun. W ostatnim roku badań odnotowano występowanie 31 nowych gatunków roślin oraz 10 wysianych, co świadczy o sukcesji spontanicznej. Opisał to Klimont (2010) na zrehabilitowanych terenach poeksploatacyjnych siarki oraz Klimont i Bulińska-Radomska (2009) jak również Majtkowski i Majtkowska (2012) na składowiskach popiołów paleniskowych.

Odnotowano 50% wzrost zawartości materii organicznej w poziomie organiczno-próchnicznym i 30% w warstwie podpróchnicznej z wierzchowiny składowiska. Na zboczu przyrost ten wyniósł odpowiednio ok. 40 i 2% (tab. 3). Według Grzywnowicza i Strutyńskiego (1999) w glebie użyźnionej osadem ściekowym następuje wzrost zawartości biologicznie czynnej próchnicy i pojemności sorpcyjnej.

Tabela 3

Zawartość składników pokarmowych i materii organicznej w popiołach paleniskowych wzbogaconych osadami ścieków komunalnych oraz w materiale roślinnym pobranym z tego podłoża (2010–2012)
Contents of nutrients and organic matter in furnace ashes enriched with municipal sewage sludge and plant material taken from this substrate (2010–2012)

Gatunek rośliny Plant species	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha ⁻¹)	Głębokość pobierania Sampling depth (cm)	Cechy — Traits							
			Podłoże — Substrate				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			pH (w 1n KCl)							
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Kontrola — Control	0	popiół — ash	8,7	8,5	8,5	8,6	110,5	77,5	122,7	103,6
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	300	0-10	7,4	7,5	7,7	7,5	146,0	177,3	147,3	156,9
10-20		8,2	7,8	7,8	7,9	86,6	179,7	143,0	136,4	
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	300	0-10	7,8	7,8	7,9	7,8	170,4	133,2	125,2	142,9
10-20		8,5	8,3	8,1	8,3	126,5	83,5	108,4	106,1	
NIR α =0,05 — LSD α =0.05			n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	14,50	14,50	14,50	14,50
			Materiał roślinny — Plant material							
			Ca (g·kg ⁻¹)				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grass with legumes (top parts of upland)			6,46	5,64	7,59	6,56	—	—	—	—
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grass with legumes (slope)			5,50	4,96	5,87	5,44	—	—	—	—

Gatunek rośliny Plant species	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha ⁻¹)	Głębokość pobierania Sampling depth (cm)	Cechy — Traits							
			Podłoże — Substrate				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			P (mg·kg ⁻¹)							
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Kontrola — Control	0	popiół — ash	159	235	137	177	110,5	77,5	122,7	103,6
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	300	0-10	185	266	231	227	146,0	177,3	147,3	156,9
10-20		181	270	205	219	86,6	179,7	143,0	136,4	
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	300	0-10	283	264	216	254	170,4	133,2	125,2	142,9
10-20		192	209	164	188	126,5	83,5	108,4	106,1	
NIR α =0,05 — LSD α =0.05			32,23	32,23	32,23	32,23	14,50	14,50	14,50	14,50
			Materiał roślinny — Plant material							
			P (g·kg ⁻¹)				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)			2,56	3,23	3,45	3,08	—	—	—	—
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)			2,03	2,56	2,85	2,49	—	—	—	—

Gatunek rośliny Plant species	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha ⁻¹)	Głębokość pobierania Sampling depth (cm)	Cechy — Traits							
			Podłoże — Substrate				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			K (mg·kg ⁻¹)							
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Kontrola — Control	0	popiół — ash	105	146	186	146	110,5	77,5	122,7	103,6
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	300	0-10	136	212	91	146	146,0	177,3	147,3	156,9
10-20		121	127	114	121	86,6	179,7	143,0	136,4	
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	300	0-10	274	167	99	180	170,4	133,2	125,2	142,9
10-20		126	133	100	120	126,5	83,5	108,4	106,1	
NIR α =0,05 — LSD α =0.05			12,42	12,42	12,42	12,42	14,50	14,50	14,50	14,50
			Materiał roślinny — Plant material							
			K (g·kg ⁻¹)				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)			38,81	45,73	35,75	40,09	—	—	—	—
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)			37,75	35,25	30,34	34,45	—	—	—	—

Gatunek rośliny Plant species	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha ⁻¹)	Głębokość pobierania Samplin depth (cm)	Cechy — Traits							
			Podłoże — Substrate				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			Mg (mg·kg ⁻¹)							
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Kontrola — Control	0	popiół — ash	102	172	295	190	110,5	77,5	122,7	103,6
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	300	0-10	196	183	164	181	146,0	177,3	147,3	156,9
10-20		156	105	146	136	86,6	179,7	143,0	136,4	
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	300	0-10	300	236	184	240	170,4	133,2	125,2	142,9
10-20		230	155	210	198	126,5	83,5	108,4	106,1	
NIR α =0,05 — LSD α =0.05			17,56	17,56	17,56	17,56	14,50	14,50	14,50	14,50
			Materiał roślinny — Plant material							
			Mg (g·kg ⁻¹)				materia organiczna organic matter (g·kg ⁻¹)			
			2010	2011	2012	\bar{x}	2010	2011	2012	\bar{x}
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)			3,64	3,01	3,34	3,33	—	—	—	—
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)			3,12	2,56	2,34	2,67	—	—	—	—

n.s. — różnica nieistotna; not significant difference

Odnotowano wzrost zawartości przyswajalnego fosforu o ok. 30% na wierzchowinie i o 45% na zboczach w warstwie próchnicznej. Zawartość potasu i magnezu w zasadzie nie uległa zmianie na wierzchowinie, ale wzrosła o ok. 25% na zboczu.

Tabela 4

Zawartość metali ciężkich w popiołowej (glebotwórczej) pokrywie na składowisku odpadów komunalnych w Uhowie (2010–2012)
Contents of heavy metals in soil forming ash layer on municipal waste stockyard at Uhowo site (2010–2012)

Gatunek rośliny Plant species	Dawka osadów ściekowych Dose of sewage sludge (t·ha ⁻¹)	Głębokość pobierania Sampling depth (cm)	Składniki Elements									
			Cd (mg·kg ⁻¹)	Cu (mg·kg ⁻¹)	Fe (mg·kg ⁻¹)	Mn (mg·kg ⁻¹)	Ni (mg·kg ⁻¹)	Pb (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)	As (mg·kg ⁻¹)	Cr (mg·kg ⁻¹)	Hg (mg·kg ⁻¹)
Kontrola Control	0	popiół ash	0,195	48,99	24513,9	458,02	37,77	26,86	58,52	16,88	29,43	0,419
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzcho wina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	300	0-10	0,873	62,30	23474,6	464,74	17,05	46,11	550,00	10,67	25,52	0,737
		10-20	0,423	45,88	22180,9	445,43	27,38	26,24	186,73	18,49	26,82	0,526
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	300	0-10	0,641	65,06	25096,8	471,45	28,17	40,79	312,9	17,07	31,23	0,658
		10-20	0,416	57,11	22024,6	417,26	36,44	30,49	115,08	19,15	30,29	0,608
Wartość dopuszczalnych stężeń w glebie lub ziemi wg zał. do rozp. Ministra Środowiska z dn. 9.09.2002r. Values of allowable concentrations in soil or earth acc. to ordinance of Ministry of Environment from 9.09.2002 (Dz.U.Nr 165, poz.1359)			4	150	5700 ¹⁾	1500	100	100	300	20	150	2

¹⁾ — średnia zawartość w glebie piaszczystej

¹⁾ — average content in sandy soil

W porównaniu do wyników badań uzyskanych w latach 2007-2009 stwierdzono mniejszy przyrost zawartości materii organicznej w podłożu (Klimont, Bulińska-Radomska, 2010), a także systematyczne obniżanie się pH. Zawartość makroelementów w roślinach pobranych ze zrehabilitowanej powierzchni składowiska w zasadzie mało różniła się od tej odnotowanej w roślinności porastającej laguny odwodnionych osadów ściekowych (Siuta, 2004), a Kalembasa, Kuźniemska i Godlewska (2007) donoszą, że nawożenie osadami ściekowymi powoduje istotny wzrost plonu uprawianych roślin oraz ilości zebranych w nim makroelementów.

Analiza warstwy próchnicznej i podpróchnicznej złoża wykazała przekroczenie dopuszczalnych stężeń Fe we wszystkich próbkach pobranych z obydwu warstw wierzchowiny i zbocza składowiska, oraz w popiele surowym, który był wariantem kontrolnym (tab. 4). Zawartość Zn w próbkach z warstwy próchnicznej wierzchowiny i zbocza przekroczyła dopuszczalne limity odpowiednio 1,83 i 1,04-krotnie. Zawartość pozostałych 8 metali ciężkich nie przekroczyła dopuszczalnych stężeń, co koresponduje z wynikami uzyskanymi przez Majtkowskiego i Majtkowską (2012) w badaniach na składowisku popiołów paleniskowych oraz badaniami Grzywnowicza i Strutyńskiego (2000) na glebie mineralnej. Zawartość Cd w poziomie próchnicznym wzrosła ponad 4-krotnie na wierzchowinie i ponad 3-krotnie na zboczu, a w warstwie podpróchnicznej złoża ponad 2-krotnie w próbkach pobranych z obydwu stanowisk. Zawartość Cu, Mn, Pb i Hg wyraźnie wzrosła w stosunku do kontroli w poziomie próchnicznym wierzchowiny i zbocza, natomiast w warstwie podpróchnicznej złoża w zasadzie nie uległa większym zmianom, co świadczy, że wprowadzone z osadem pierwiastki utrzymują się w próchnicznej warstwie i bardzo powoli przemieszczają się w głąb profilu podłoża. Z kolei w przypadku Ni i As większe stężenie tych pierwiastków stwierdzono w warstwie podpróchnicznej wierzchowiny i zbocza, co może wskazywać na ich przemywanie się w głąb profilu.

Analiza materiału roślinnego pobranego z wierzchowiny i zbocza składowiska wykazała przekroczenie dopuszczalnych stężeń tylko w przypadku Fe, odpowiednio 183,4 i 196,7 mg·kg⁻¹ wobec normy 20-50 mg·kg⁻¹, co może wynikać ze zwiększonej zawartości tego pierwiastka w podłożu (tab. 5). Zawartość pozostałych 9 metali ciężkich nie przekroczyła dopuszczalnych stężeń w roślinach jako paszy dla zwierząt i wartości krytycznych przyjętych do oceny roślin pod względem ich przydatności paszowej, inaczej niż w badaniach Majtkowskiego i Majtkowskiej (2012), gdzie stwierdzono przekroczenie zawartości kilku metali ciężkich, zwłaszcza cynku w pędach wybranych gatunków roślin użytych do rekultywacji składowiska popiołów, ale były to w większości drzewa i krzewy – inaczej niż w niniejszym doniesieniu, gdzie analizie poddaje się pędy roślinności zielnej (trawy i motylkowate). Według Gorłacha i Gambusia (1999) ilość metali ciężkich (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) pobranych przez rośliny nie koreluje z ich zawartością w osadach ściekowych.

Zawartość metali ciężkich w materiale roślinnym pobranym ze zrehabilitowanego składowiska odpadów komunalnych pokrytych warstwą popiołów paleniskowych w Uhowie (2010–2012)
Contents of heavy metals in plant material taken from reclaimed municipal sewage sludge stockyard covered by layer of furnace ashes at Uhowo site (2010–2012)

Gatunek rośliny Plant species	Składniki Elements									
	Cd (mg·kg ⁻¹)	Cu (mg·kg ⁻¹)	Fe (mg·kg ⁻¹)	Mn (mg·kg ⁻¹)	Ni (mg·kg ⁻¹)	Pb (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)	As (mg·kg ⁻¹)	Cr (mg·kg ⁻¹)	Hg (mg·kg ⁻¹)
Mieszanka traw z motylkowatymi (wierzchowina) Mixture of grasses with legumes (top parts of upland)	<0,06	10,73	183,4	12,47	0,876	0,793	31,86	0,141	0,823	0,017
Mieszanka traw z motylkowatymi (zbocze) Mixture of grasses with legumes (slope)	<0,06	11,54	196,7	12,56	0,996	0,795	27,37	0,173	0,834	0,016
Wartość dopuszczalnych stężeń w roślinach jako paszy dla zwierząt ¹⁾ Values of allowable concentrations in plants as fodder for animals ¹⁾	–	–	20-50	20-60	–	–	–	1	3-12	0,03
Wartości krytyczne metali śladowych przyjęte do oceny roślin pod względem ich przydatności paszowej ²⁾ Critical values of trace metals assumed for plant evaluation with regard to fodder suitability ²⁾	≤0,5	25-50	–	–	≤50,0	≤10,0	≤100,0	–	–	–

¹⁾ — Baran S., Turski R. 1996. Degradacja, ochrona i rekultywacja gleb. Wyd. AR Lublin: 223 ss.

²⁾ — Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M. Terelak H., Witek T. 1993. Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. IUNG Puławy 20 ss.

WNIOSKI

1. Rekultywacyjne pokrycie składowiska odpadów komunalnych popiołem i użyźnienie osadem ściekowym stworzyło warunki do wegetacji roślin i rozwoju gleby.
2. Na zrehabilitowanej powierzchni składowiska zachodzą dynamiczne zmiany w zbiorowisku roślinności. Najlepiej z każdym rokiem na badanym obiekcie rosła kupkówka pospolita i stokłosa bezostna a następnie kostrzewa łąkowa, której udział w poroście systematycznie maleje. Mozga trzciniowata, życica trwała i tymotka łąkowa rozwijają się słabo i powoli ustępują z runi.

3. Trawy obcego pochodzenia (perz grzebieniasty, wydmuchrzyca groniasta) po okresie słabszego rozwoju wykazują dużą dynamikę rozwoju, są bujne, wzrasta ich udział w poroście i są przydatne do rekultywacji biologicznej w polskich warunkach klimatycznych.
4. Oprócz wysianych gatunków roślin, pojawiły się nowe taksony, które systematycznie wkraczają drogą sukcesji naturalnej.
5. Osady ściekowe wraz z porastającą roślinnością gromadzą materię organiczną, składniki pokarmowe, zwiększają wodochłonność, buforują odczyn.
6. Osadowe użyźnianie popiołowej pokrywy na składowisku odpadów komunalnych zwiększyło zawartość metali ciężkich w powierzchniowej warstwie gruntu zrekultywowanego, ale nie miało to znaczącego wpływu na zawartość tych składników w roślinach.

LITERATURA

- Baran S., Turski R. 1996. Degradacja, ochrona i rekultywacja gleb. Wyd. AR Lublin: 223 ss.
- Gorlach E., Gambuś F. 1999. Wpływ osadów ściekowych na zawartość metali ciężkich w glebie i roślinach oraz ich przemieszczanie się w profilu glebowym. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 467: 505 — 511.
- Góral S., Rola S. 2001. Trawy na popiołach elektrociepłowni nawożonych osadami ściekowymi. Inżynieria Ekologiczna nr 3, PTIE Warszawa: 146 — 150.
- Góral S. 2001. Roślinność zielna w ochronie i rekultywacji gruntów. Inżynieria Ekologiczna nr 3, PTIE, Warszawa: 161 — 178.
- Grzywnowicz I., Strutyński J. 1999. Zmiany niektórych właściwości chemicznych gleby po zastosowaniu osadów ściekowych do celów nawozowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 467: 299 — 306.
- Grzywnowicz I., Strutyński J. 2000. Rolnicze zagospodarowanie osadów ściekowych jako źródło zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 472: 297 — 304.
- Jabłoński B. 2000. Krótka charakterystyka wybranych do uprawy pożytków pszczelich, w: O potrzebie i możliwościach poprawy pożytków pszczelich. Oddz. Pszczelnictwa ISiK, Puławy: 24 — 71.
- Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M., Terelak H., Witek T. 1993. Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. IUNG Puławy 20 ss.
- Kalembasa S., Kuziemska B., Godlewska A. 2007. Osady ściekowe jako potencjalne źródło makroelementów dla roślin. Inżynieria Ekologiczna 18, PTIE, Warszawa: 132 — 133.
- Kasprzyk R. 2011. Wpływ składowiska odpadów komunalnych na jakość wód podziemnych. Roczniki Gleboznawcze Tom LXII Nr 2. Warszawa: 172 — 178
- Klimont K. 2005. Badanie rozwoju roślinności na terenach zdewastowanych. Sprawozdanie roczne z realizacji tematu, maszynopis, IHAR Radzików: 7ss.
- Klimont K. 2010. Sukcesja roślin na terenach poeksploatacyjnych Kopalni Siarki „Jeziórko”, Biul. IHAR 257/258: 29 — 37.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z. 2009. Badania rozwoju wybranych gatunków traw do umacniania składowisk popiołów paleniskowych z elektrociepłowni. Problemy Inżynierii Rolniczej 2: 135 — 145.
- Klimont K., Bulińska-Radomska Z. 2010. Przydatność wybranych gatunków roślin do rekultywacji składowiska odpadów komunalnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. z. 556: 827 — 835.
- Majtkowski W., Majtkowska G. 2012. Fitosanitarna rola szaty roślinnej na zrekultywowanej hałdzie popiołów w Sowlanach k. Białegostoku. Biul. IHAR 263: 55 — 63.
- Majtkowski W., Podyma W., Góral S. 1996. Gatunki roślin do rekultywacji terenów zdegradowanych przez przemysł i gospodarkę komunalną, w: Nowe rośliny uprawne na cele spożywcze, przemysłowe jako odnawialne źródło energii. SGGW, Warszawa: 136 — 148.
- Pawluśkiewicz B., Gutkowska A. 2005. Występowanie zbiorowisk trawiastych na rekultywowanym składowisku popiołów elektrowniowych. Łąkarstwo w Polsce 8: 115 — 172.

- Prończuk I. 1994. Popioły, melioracja i ochrona. *Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie* 5: 8 — 12.
- Siuta J. 2004. Rekultywacja terenu lagun osadowych w oczyszczalni ścieków „Hajdów”. *Inżynieria Ekologiczna* nr 9, PTIE, Warszawa: 43 — 54.
- Siuta J. 2004. Rekultywacja i zagospodarowanie terenu wysypiska odpadów komunalnych w Kawęczynie. *Inżynieria Ekologiczna* nr 9, PTIE, Warszawa: 67 — 76.
- Siuta J., Kutla G. 2005. Rekultywacyjne działanie osadów ściekowych na złożach odpadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna* 10, PTIE Warszawa: 58 — 69.