

PLONY I CHEMIZM ROŚLIN WIELOWARIANTOWEGO DOŚWIADCZENIA NA MODELOWYM ZŁOŻU ODPADÓW PALENISKOWYCH ENERGETYKI WĘGLOWEJ. CZĘŚĆ II (LATA 2012 – 2013)

Jan Siuta¹, Kazimierz H. Dyguś²

¹ Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Krucza 5/11d, 00-548 Warszawa, e-mail: jan.siuta@ios.edu.pl

² Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Wydział Ekologii, ul. Olszewska 12, 00-792 Warszawa, e-mail: dygus@wseiz.pl

STRESZCZENIE

W doświadczeniu modelowym na gruncie popiołowym badano rekultywacyjną efektywność kompostów wyprodukowanych ze zmieszanych odpadów komunalnych (Radiowo i ZUSOK), kompostów z odpadów zieleni miejskiej (Complex), masy roślinnej trawników osiedlowych (roślinny) i komunalnego osadu ściekowego oraz nawozu mineralnego (NPK – bez nawożenia organicznego). Doświadczenie zapoczątkowano w roku 2005 i kontynuowano do końca roku 2013. Plony roślin zbierano i analizowano w latach 2005, 2006 i 2011–2012. W latach 2007–2010 nie prowadzono zabiegów agrotechnicznych, ograniczając się do obserwacji naturalnej (spontanicznej) sukcesji roślin. Rekultywacyjne dawki kompostów i osadu ściekowego mierzono objętościowo, toteż różniły się one pod względem zawartości suchej masy, zawartości substancji organicznej i składników mineralnych w suchej masie. Sumaryczne plony suchej masy roślin (w latach 2005–2013) były największe w wariancie Complex, następnie w wariantach Radiowo i roślinnym, a najmniejsze w wariancie ZUSOK. Plonotwórcza efektywność nawozu NPK była mniejsza od wariantów kompostowych i osadowego. Natomiast plonotwórcza efektywność osadu ściekowego była mniejsza od jego potencjału nawozowego, ponieważ był on niestabilizowany i trudny od wymieszania z podłożem. Pokazano potencjał plonotwórczy roślin na doświadczalnych złożach odpadów paleniskowych nawożonych kompostami i osadami ściekowymi oraz przykłady obiektów zastosowania osadów ściekowych do biologicznej rekultywacji składowisk i zwałowisk.

Słowa kluczowe: modelowe złożo popiołu, plonotwórcza efektywność, chemizm roślin, komposty, osad ściekowy, nawóz NPK.

CROPS AND CHEMISM OF PLANTS OF A MULTIVARIANT MODEL EXPERIMENT ON COAL COMBUSTION WASTE DEPOSITS. PART II (2012 – 2013)

ABSTRACT

Reclamation efficiency of composts produced from the mixture of municipal waste (Radiowo and ZUSOK), urban green waste composts (Complex), housing estate lawn mowing waste (plants) and sewage sludge, as well as mineral fertilizer (NPK – without the use of any organic fertilizer), was assessed in a model experiment on an ash soil. The experiment was launched in 2005 and continued until the end of 2013. Crops were collected and subjected to the analysis in 2005, 2006 and between 2011 and 2012. In the period between 2007 and 2010 no agrotechnical treatments were carried out, with the experiment being limited to mere observation of the natural (spontaneous) succession of plants. Reclamation doses of composts and sewage sludge were measured quantitatively, therefore they differed in the content of dry matter as well as in the contents of organic substances and minerals in the dry matter. The largest aggregated dry matter yield of plants (2005–2013) was reported in the Complex variant, and similarly, in the Radiowo and plant variants, whereas the ZUSOK variant reported the lowest aggregated dry matter field of plants. The yield-forming efficiency of NPK fertilizer was lower than in the case of compost and sludge variants. However, the field-forming efficiency of sewage sludge was lower than its fertilization potential as it was unstable and difficult to mix with the experimental soil. The results showed the yield-forming potential of plants on the experimental coal combustion waste deposits fertilized with composts and sewage sludge as well as the examples of the sites where sewage sludge could be used for the biological reclamation of landfills and spoil tips.

Keywords: model ash deposit, yield-forming efficiency, chemism of plants, composts, sewage sludge, NPK fertilizer.

WSTĘP

Bardzo duża pyłowa uciążliwość (dla ludzi, przyrody, infrastruktury technicznej) odpadów z energetycznego spalania węgla kamiennego i brunatnego sprawiła konieczność podjęcia badań i opracowania skutecznych sposobów ograniczenia tych uciążliwości na terenach przyległych do miejsc składowania [Hryncewicz i in. 1972; Żak 1972, 1994; Kałędkowska, Borysewicz 1994; Rosik-Dulewska 1980] oraz wzdłuż dróg transportu tych odpadów do miejsc przeznaczenia – deponowania w środowisku. Dotyczy to całego okresu składowania odpadów oraz zabezpieczenia (utrwalenia powierzchni) składowiska po zakończeniu jego eksploatacji.

Spośród wielu sposobów ograniczenia pyłowej uciążliwości w czasie składowania odpadów paleniskowych oraz wyeliminowania jej po zakończeniu eksploatacji składowiska najprostszym, najtańszym i najtrwalszym sposobem jest roślinne utrwalenie powierzchni złoża odpadów paleniskowych.

Przeprowadzono liczne doświadczenia w zakresie możliwości i sposobów roślinnego utrwalania powierzchni składowisk odpadów energetyki węglowej [Hryncewicz i in. 1972; Maciak i in. 1976a, b; Biernacka 1976; Rosik-Dulewska 1980; Siuta i in. 1988; Siuta i in. 1996; Wysociki 1984] oraz rekultywacyjnego zazieleniania i porekultywacyjnego użytkowania składowiskowych gruntów [Maciak i in. 1976; Biernacka 1976; Wysocki 1984, 1988; Siuta i in. 1988; Kozłowska 1995, 1997; Siuta 2005, 2007; Gilewska, Przybyła 2011; Dyguś i in. 2012; Dyguś, Sienkiewicz 2014].

Złóża odpadów paleniskowych są potencjalnie bardzo dobrymi glebotwórczymi gruntami, ponieważ: 1) ich skład ziarnowy (mechaniczny) tworzy bardzo korzystne relacje powietrzno-wodne, 2) zawiera (oprócz azotu) wszystkie składniki mineralne niezbędne do życia i rozwoju roślin [Siuta 1998, 2002].

Nadmierna (szkodliwa) alkaliczność i zawartość soli rozpuszczalnych w wodzie złoża odpadów paleniskowych są neutralizowane i odsalane pod wpływem opadów atmosferycznych, działania dwutlenku węgla zawartego w powietrzu atmosferycznym oraz wydzielanego przez korzenie roślin i organizmy glebowe, jak też w skutek przemywania wodami opadów atmosferycznych.

Niedostatek azotu oraz brak biologicznie czynnej materii organicznej rekompensuje się od-

powiednio dużymi (rekultywacyjnymi) dawkami próchnicotwórczej substancji organicznej (np. osady ściekowe, komposty, obornik, nawozy zielone itp.). Odpowiednio duże (rekultywacyjne) dawki wymienionych nawozów organicznych tworzą niemal natychmiast warunki do prawidłowego wzrostu roślin wysianych i samosiewnych. A co najważniejsze szybko utrwalają powierzchnie bezglebowego (pyłącego) złoża, są łatwe do wykonania i niekosztowne.

Alternatywą dla rekultywacyjnych dawek nawozów organicznych jest pokrywanie powierzchni składowiska warstwą ziemi próchnicznej – zabiegu kosztownego o ograniczonej dostępności tego zasobu. Spośród wszystkich dostępnych (wymienionych i niewymienionych) materii (nawozów) organicznych najefektywniejsze w rekultywacji złóż pyłących są komunalne osady ściekowe, które obfitują w biologicznie aktywną substancję organiczną, azot, fosfor, wapń, magnez i mikroskładniki niezbędne do życia roślin.

METODYKA I ZAKRES BADAŃ

Modelowe (glebotwórcze) złoża odpadów paleniskowych (popiołu) ukształtowano w pojemnikach o średnicy 80 cm (0,5 m² powierzchni) i 100 cm wysokości. Pojemniki te zbudowano i użytkowano jako lizymetry, w których przeprowadzono wielowariantowe doświadczenie nad rekultywacyjną efektywnością kompostu Radiowo i osadu ściekowego [Siuta i in. 1993, 1997; Siuta, Wasiak 2000].

W roku 2005 badano rekultywacyjną efektywność kompostu roślinnego [Madej 2007], kompostu Radiowo [Siuta 1999], kompostu ZUSOK [Wójcik 2007], odwodnionego mechanicznie osadu ściekowego, NPK bez udziału nawozu organicznego (tab. 1). W roku 2006 wprowadzono dodatkowo wariant z kompostem Complex [Opaliński 2007]. Fizyczne i chemiczne właściwości popiołowego złoża oraz nawozów organicznych przedstawia tabela 2.

W latach 2007–2010 nie prowadzono żadnych zabiegów uprawowych (w tym nawozowych). Obserwowano natomiast wzrost oraz naturalną sukcesję roślinności. W latach 2011–2013 kontynuowano doświadczenie bez wariantu z ziemią próchniczną. Wiosną 2011 roku w pojemnikach doświadczalnych wysiano mieszankę wysokich traw łąkowych i gorczycę białą. Modelowe złoża zasilono azotofoską zawierającą: 13,6% azotu;

Tabela 1. Schemat nawożenia**Table 1.** Fertilization scheme

Wprowadzane substancje	Dawki substancji użyźniających					
	dm ³ /0,5 m ²			m ³ /ha		
Osad ściekowy	5,0	10,0	15,0	100	200	300
Kompost roślinny	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost z Radiowa	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost z ZUSOK	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost Complex ¹⁾	5,0	7,5	10,0	100	150	200
NPK	g/0,5 m ²			kg/ha		
Azot (N)	7,5	10,0	12,5	150	200	250
Fosfor (P ₂ O ₅)	3,5	4,5	6,0	70	90	120
Potas (K ₂ O)	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Razem NPK	16,0	22,0	28,5	320	440	570

¹⁾ Od 2006 roku.

Tabela 2. Właściwości substancji zastosowanych w doświadczeniu**Table 2.** Properties of substances used in the experiment

Oznaczenie właściwości	Rodzaj substancji				
	Kompost Radiowo	Kompost roślinny	Kompost ZUSOK	Kompost Complex	Osad ściekowy
Zawartość substancji organicznej w s.m. w %	25,8	42,8	24,0	74,4	37,7
Zawartość węgla organicznego w s.m. w %	12,8	19,3	11,9	39,2	21,2
Zawartość azotu w s.m. w %	1,1	2,1	1,0	5,8	1,4
Zawartość fosforu w s.m. w %	0,6	0,8	0,5	1,5	0,6
Zawartość potasu w s.m. w %	0,5	1,0	0,8	0,3	1,3
C : N	10,8	9,2	11,9	6,1	15,1
pH	7,8	7,2	7,9	7,1	7,9
Masa świeża w g/dm ³	807	330	790	950	490
Masa sucha w g/dm ³	472	219	504	185	350
Zawartość wody w %	40,1	31,7	36,9	80,9	40
Zawartość azotu w gN/ dm ³	5,2	4,6	5,0	11,0	n.o.

n.o. – nie oznaczono.

6,4% P₂O₅; 19,1% K₂O; 19,1% CaO; 4,5% MgO i 23,0% SO₃ z udziałem Cu, Fe, Mn, Mo i Zn [Siuta, Dyguś 2013].

Udział flory w doświadczeniu modelowym oraz jej analizy biologiczne i ekologiczne za lata 2011 i 2012 opisali Dyguś i Madej [2012]. Wykazano m.in., że w czasie dwuletniego doświadczenia notowano 67 gatunków roślin naczyniowych należących do 17 taksonów w randze rodzin, wśród których najliczniejszy udział miały gatunki z rodzin: złożone, komosowate i krzyżowe. Spośród stwierdzonych 10 grup syntaksonomicznych w randze klas największy udział miały gatunki segetalne, ruderalne i łąkowe. Formy życiowe roślin zdominowały gatunki jednoroczne (terofity) i naziemnopączkowe (hemikryptofity).

W latach 2012 i 2013 nie stosowano nawożenia mineralnego, ani organicznego. Natomiast poddano ocenie przebieg wegetacji i skład gatunkowy roślin z ostatnich trzech lat (2011–2013) doświadczenia [Dyguś i in. 2014]. Z analiz za ten okres wynika, że w początkowym stadium zasadniczą rolę w kreowaniu procesu glebotwórczego miały rośliny jednoroczne. W następnych latach dominowały trawy oraz rośliny dwuliścienne, przyczyniając się znacznie do utrwalania doświadczonego złoża.

Plony trzykrotnych (w roku) zbiorów roślin, zawartości w nich azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu i sodu w suchej masie oraz zawartości substancji organicznej i wartości *pH* w wierzchniej (0–5 cm) warstwie gruntu przedstawiają tabele 3 i 4.

Tabela 3. Plony suchej masy roślin w latach 2012 i 2013 w g/m²**Table 3.** Dry matter yield of plants (g/m²) in 2012 and 2013

Dawka nawozu	Zbiory i plony roślin w 2012 r.				Zbiory i plony roślin w 2013 r.			
	I	II	III	Suma plonów I-III	I	II	III	Suma plonów I-III
	Data zbioru				Data zbioru			
	22.05	26.07	21.09		29.05	30.07	26.09	
NPK bez nawożenia organicznego								
32 g	74,4	208,0	98,9	381,3	40,3	147,9	48,0	236,2
32 g	101,6	254,8	126,8	483,2	85,8	211,2	64,6	361,6
44 g	89,3	268,4	141,9	499,6	71,1	201,9	57,0	330,0
44 g	112,0	276,1	155,9	544,0	82,4	158,4	62,8	303,6
57 g	79,4	276,3	122,0	477,7	66,5	176,5	49,1	292,1
57 g	184,9	244,4	100,1	529,4	112,0	131,2	61,6	304,8
Kompost Radiowo (kR)								
10 dm ³	251,2	374,3	150,2	775,7	195,6	261,7	89,6	546,9
10 dm ³	289,9	221,2	87,9	599,0	210,7	207,5	122,5	540,7
15 dm ³	303,4	267,3	123,0	693,7	240,2	170,4	98,9	509,5
15 dm ³	165,3	255,4	107,7	528,4	124,4	240,8	58,2	423,4
20 dm ³	334,0	276,6	112,1	722,7	284,9	204,2	107,8	596,9
20 dm ³	287,1	343,1	148,4	778,6	206,2	369,7	138,8	714,7
Kompost Complex (kC)								
10 dm ³	564,2	398,0	155,9	1118,1	730,5	303,6	154,3	1188,4
10 dm ³	404,6	313,7	133,1	851,4	470,0	255,1	127,8	852,9
15 dm ³	287,3	222,0	89,2	598,5	215,7	224,3	113,3	553,3
15 dm ³	433,8	407,7	211,0	1052,5	300,8	374,2	120,0	795,2
20 dm ³	508,9	385,2	131,1	1025,2	425,1	287,9	152,5	865,5
20 dm ³	712,7	311,8	105,2	1129,7	630,7	258,7	165,1	1054,5
Kompost roślinny (kr)								
10 dm ³	411,0	287,3	110,1	808,4	230,8	201,8	83,7	516,3
10 dm ³	177,3	181,0	82,3	440,6	95,4	244,7	105,7	445,8
15 dm ³	134,8	198,1	77,3	410,2	78,9	143,5	87,8	310,2
15 dm ³	172,8	218,4	83,0	474,2	66,5	189,9	79,9	336,3
20 dm ³	167,7	178,1	57,9	403,7	82,1	192,6	111,5	386,2
20 dm ³	161,2	215,9	72,2	449,3	90,7	202,0	88,6	381,3
Kompost ZUSOK (kZ)								
10 dm ³	171,0	251,9	112,0	534,9	59,0	132,5	65,6	257,1
10 dm ³	178,1	289,1	148,4	615,6	84,5	211,0	121,7	417,2
15 dm ³	251,5	311,0	96,2	658,7	102,7	172,3	78,8	353,8
15 dm ³	127,2	188,7	104,3	420,2	54,9	198,4	60,0	313,3
20 dm ³	144,2	276,4	129,2	549,8	67,6	179,0	72,8	319,4
20 dm ³	182,0	317,8	163,7	663,5	71,1	203,2	80,9	355,2
Osad ściekowy (O)								
10 dm ³	98,1	141,1	73,1	312,3	58,8	121,4	44,3	224,5
10 dm ³	373,2	319,5	151,0	843,7	215,2	289,7	100,2	605,1
15 dm ³	301,4	268,3	142,5	712,2	221,1	231,6	87,9	540,6
15 dm ³	331,2	264,8	133,3	729,3	216,8	230,0	102,8	549,6
20 dm ³	351,6	227,6	125,2	704,4	230,0	187,5	97,1	514,6
20 dm ³	262,2	206,2	131,1	599,5	221,5	245,8	106,8	574,1

Tabela 4. Plony suchej masy roślin (w g/m²) w latach 2005–2013
Table 4. Dry matter yield of plants (g/m²) in the period 2005–2013

Dawka nawozu	Lata					Σ
	2005	2006	2011	2012	2013	
N, P₂O₅, K₂O (NPK)						
32 g	172	73	860	432	299	1836
44 g	136	214	784	522	317	1973
57 g	161	311	427	504	298	1701
Kompost Radiowo (kR)						
10 dm ³	114	230	911	687	544	2486
15 dm ³	185	216	905	611	466	2383
20 dm ³	184	214	835	751	656	2640
Kompost Complex (kC)						
10 dm ³	b.d.	256	1024	985	1021	3286
15 dm ³	b.d.	406	1077	826	674	2983
20 dm ³	b.d.	582	1735	1077	960	4354
Kompost roślinny (kr)						
10 dm ³	313	296	682	625	481	2397
15 dm ³	436	326	887	442	323	2414
20 dm ³	548	366	901	427	384	2626
Kompost ZUSOK (kZ)						
10 dm ³	323	257	318	575	337	1810
15 dm ³	413	317	389	539	334	1992
20 dm ³	573	347	572	607	337	2436
Osad ściekowy (O)						
10 dm ³	346	355	416	578	415	2110
15 dm ³	380	374	1103	721	545	3123
20 dm ³	412	694	1285	652	544	3587

b.d. – brak danych.

Sporządzono też sumaryczne zestawienie poszczególnych składników (azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu i sodu) zawarte w plonach roślin, zebranych z poszczególnych wariantów rekultywacyjnego użytkowania modelowego, popiołowego gruntu (tab. 5).

WYNIKI BADAŃ

Plony roślin

Sumy suchej masy plonów roślin z lat 2012 i 2013, wyrażone w g/m² powierzchni doświadczalnych pojemników, przedstawiono w tabeli 3. Dane te ukazują wielkości plonów roślin z poszczególnych modeli użytkowanych trzema różnymi wariantami (dawkami) nawozów podczas dwuletnich badań. Minimalne i maksymalne plonowanie roślin w analizowanych latach przedstawiało się następująco:

- 1) Plony roślin wariantu NPK bez nawożenia organicznego w roku 2012 były znacznie większe (381, 3–544,0 g/m²) niż w roku 2013 (236,2–361,6 g/m²).
- 2) Plony roślin wariantu kompost Radiowo w roku 2012 wyniosły 528,4–778,6 g/m² i były porównywalne z plonami w roku 2013, stanowiły 423,4–714,7 g/m².
- 3) Plony roślin wariantu kompost Complex wyniosły od 598,5 do 1129,7 g/m² w roku 2012 oraz 553,3–1188,4 g/m² w roku 2013, były zatem zbliżone.
- 4) Plony wariantu kompost roślinny wyniosły 403,7–808,4 g/m² w roku 2012 oraz 310, 2–516,3 g/m² w roku 2013.
- 5) Plony roślin wariantu kompost ZUSOK wyniosły 420,2–663,5 g/m² w roku 2012, a w roku 2013 były ewidentnie niższe i stanowiły 257,1–417,2 g/m².

Tabela 5. Zawartości azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu i sodu w roślinach doświadczenia modelowego ze złożem odpadu paleniskowego energetyki węglowej

Table 5. Content of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sodium in the vegetation of a model experiment on coal combustion waste deposits

Dawka nawozu	Procent suchej masy					
	Azot (N)	Fosfor (P)	Potas (K)	Wapń (Ca)	Magnez (Mg)	Sód (Na)
NPK bez nawożenia organicznego						
32 g	2,25	0,33	2,89	1,20	0,65	0,08
44 g	2,32	0,39	2,63	1,28	0,62	0,04
57 g	2,32	0,29	2,60	0,85	0,57	0,02
Kompost Radiowo (kR)						
10 dm ³	2,63	0,31	1,85	1,67	0,38	0,04
15 dm ³	2,51	0,34	2,23	1,49	0,54	0,06
20 dm ³	2,13	0,36	1,76	1,91	0,46	0,05
Kompost Complex (kC)						
10 dm ³	2,77	0,31	3,04	1,28	0,67	0,06
15 dm ³	3,12	0,38	3,63	1,57	1,41	0,06
20 dm ³	2,53	0,30	1,97	1,19	0,47	0,04
Kompost roślinny (kr)						
10 dm ³	2,68	0,40	3,21	1,29	0,68	0,07
15 dm ³	2,97	0,38	4,11	1,23	0,55	0,02
20 dm ³	2,40	0,37	3,07	1,34	0,54	0,05
Kompost ZUSOK (kZ)						
10 dm ³	2,68	0,31	2,44	1,27	0,84	0,04
15 dm ³	2,41	0,31	2,44	0,84	0,53	0,03
20 dm ³	3,10	0,36	3,81	1,09	1,08	0,05
Osad ściekowy (O)						
10 dm ³	2,39	0,31	2,01	0,71	0,32	0,11
15 dm ³	3,54	0,24	2,15	0,64	0,27	0,10
20 dm ³	3,49	0,25	2,27	0,47	0,25	0,18

6) Plony roślin wariantu osad ściekowy były wyraźnie zróżnicowane w poszczególnych dawkach nawożenia i wahały się od 312,3 do 843,7 g/m² w roku 2012 oraz od 224,5 do 605,1 g/m² w roku 2013.

Generalnie w roku 2013 plony roślin wszystkich wariantów doświadczenia były niższe niż w roku 2012. Zadecydował o tym wyraźny niedobór opadów atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym oraz gorsze zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe w trzecim roku po nawożeniu NPK. Na szczególną uwagę zasługuje duże zróżnicowanie wielkości plonu roślin w obrębie większości nawozowych wariantów. Dotyczy to zwłaszcza roku 2012, ale także w roku 2013 (wariant Complex). Główną przyczyną dużego zróżnicowania wielkości plonów w obrębie poszczególnych wariantów doświadczenia upatruje się w nierównomiernym i bardzo ekspansywnym wkraczaniu

spontanicznych gatunków roślin dwuliściennych [Dyguś i in. 2014].

Pełniejszy obraz plonotwórczej (rekultywacyjnej) efektywności stosowanych nawozów daje zestawienie sumy plonów roślin za lata 2005, 2006 i 2011–2013 (tab. 4).

W wariacie NPK (bez nawożenia organicznego) sumaryczne plony roślin były mniejsze (1701–1973 g/m²) niż w pozostałych wariantach (1810–4354 g/m²), ale bliskie wariantowi ZUSOK (1810–2436 g/m²). Plony wariantu kompost roślinny były bliskie (2397–2626 g/m²) plonów wariantu kompostu Radiowo (2383–2640 g/m²). Największą plonotwórczą efektywnością wykazał kompost Complex (2983–4354 g/m²).

Plonotwórcza efektywność osadu ściekowego (2110–3587 g/m²) była znacznie mniejsza od jego potencjału nawozowego. Przyczyny mniejszej od potencjalnej efektywności osadu ściekowego były następujące:

- maźista konsystencja osadu uniemożliwiła wymieszanie go z popiołowym złożem;
- niemal bezpośrednio po wprowadzeniu osadu do wierzchniej warstwy popiołowego złoża wystąpił burzowy opad atmosferyczny, którego wody nie miały możliwości spływu, bo powierzchnia popiołowego złoża zalegała 5 cm niżej od krawędzi pojemnika;
- zawodnienie i zagniwanie osadu ściekowego zminimalizowało wschody wysianych nasion;
- niezintegrowana z popiołowym złożem maź osadowa przeobraziła się w nieaktywną brylowatą postać;
- w pierwszym roku doświadczenia nie było warunków do pełnego zazielenienia powierzchni modelowego gruntu.

Chemizm roślin

Procentowe zawartości składników mineralnych w roślinach zbioru letniego 2013 roku przedstawiono w tabeli 5. Skrajne zawartości tych składników w roślinach doświadczenia modelowego dla stosowanych dawek w poszczególnych wariantach wynoszą:

- 1) Zawartości azotu: 2,25–2,32% w wariacie NPK; 2,13–2,63% w wariacie kompost Radiowo; 2,53–3,12% w wariacie kompost Complex; 2,40–2,97% w wariacie kompost roślinny; 2,41–3,10% w wariacie kompost ZUSOK; 2,39–3,54% w wariacie osad ściekowy.
- 2) Zawartości fosforu: 0,29–0,39% w wariacie NPK; 0,31–0,36% w wariacie kompost Radiowo; 0,30–0,38% w wariacie kompost Complex; 0,37–0,40% w wariacie kompost roślinny; 0,31–0,36% w wariacie kompost ZUSOK; 0,24–0,31% w wariacie osad ściekowy.
- 3) Zawartości potasu: 2,60–2,89% w wariacie NPK; 1,76–2,23% w wariacie kompost Radiowo; 1,97–3,63% w wariacie kompost Complex; 3,07–4,11% w wariacie kompost roślinny; 2,44–3,81% w wariacie kompost ZUSOK; 2,01–2,27% w wariacie osad ściekowy.
- 4) Zawartości wapnia: najmniej wapnia wykazano (0,47–0,71%) w wariacie osad ściekowy, a najwięcej (1,49–1,91%) w wariacie kompost Radiowo; komposty Radiowo, Complex i roślinny zawierały niemal te same ilości wapnia (1,19–1,91%).
- 5) Zawartości magnezu: najmniej magnezu (0,25–0,32%) było w roślinach wariantu osad ściekowy, a najwięcej w wariantach kompostowych Complex – 0,47–1,41% i ZUSOK –

0,53–1,08%; rośliny wariantów NPK i kompost roślinny zawierały odpowiednio 0,57–0,65% i 0,54–0,68% magnezu; w wariantach kompost Radiowo było tylko 0,38–0,54% tego składnika.

- 6) zawartości sodu: w roślinach prawie wszystkich wariantów (oprócz osadu ściekowego) procentowe ilości sodu były znikome (0,02–0,08%), w wariacie osadu ściekowego wahały się w przedziale 0,10–0,18%.

Zaopatrzenie roślin w główne składniki pokarmowe (N, P, K, Ca, Mg) było optymalne, a znaczne wahania w obrębie poszczególnych wariantów i dawek nawozowych, to efekt zróżnicowanego udziału ekspansywnych roślin dwuliściennych.

Zawartości substancji organicznej (tab. 6) w wierzchniej (0–5 cm) warstwie gruntu popiołowego mieściły się w przedziale 14,0–20,7% suchej masy. Są to duże zawartości w płytkiej

Tabela 6. Wartości *pH* i zawartości substancji organicznej w wierzchniej warstwie (0–5 cm) gruntu

Table 6. *pH* values and organic matter content in the top layer (0–5 cm) of the ground

Dawka nawozu	<i>pH</i> H ₂ O	<i>pH</i> KCl	Substancja organiczna (%)
NPK bez nawożenia organicznego			
32 g	8,16	7,70	15,6
44 g	8,20	7,80	14,5
57 g	8,31	7,86	14,0
Kompost Radiowo (kR)			
10 dm ³	7,95	7,52	20,0
15 dm ³	7,93	7,55	20,7
20 dm ³	7,79	7,52	20,5
Kompost Complex (kC)			
10 dm ³	7,88	7,47	17,7
15 dm ³	7,94	7,50	19,0
20 dm ³	7,98	7,49	16,8
Kompost roślinny (kr)			
10 dm ³	8,12	7,74	17,2
15 dm ³	8,07	7,57	19,1
20 dm ³	8,17	7,79	17,7
Kompost ZUSOK (kZ)			
10 dm ³	8,13	7,82	15,0
15 dm ³	8,25	7,76	18,4
20 dm ³	8,11	7,75	17,4
Osad ściekowy (O)			
10 dm ³	8,21	7,96	15,9
15 dm ³	8,00	7,83	17,3
20 dm ³	8,14	7,81	17,7

(darniowej) warstwie, stanowiące resztki nawozów organicznych darniowej masy roślinnej oraz niespalone resztki paliwa (węgla). Wartości pH H_2O w analizowanym gruncie najwyższe wykazano w wariantach: NPK, kompost roślinny, kompost ZUSOK i osad ściekowy (8,00–8,31); nieco niższe wartości pH H_2O notowano w wariantach kompost Radiowo i kompost Complex (7,79–7,98). Podobną zależność wykazano także dla wartości pH KCl (tab. 6).

DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

Rekultywacyjne dawki kompostów i osadu ściekowego, zastosowanych w doświadczeniu, mierzono objętościowo niezależnie od zawartości w nich suchej masy substancji organicznej i mineralnych składników nawozowych (pokarmowych).

Sucha masa w kompostach wyniosła: 472 g/dm³ – Radiowo; 504 g/dm³ – ZUSOK; 219 g/dm³ – roślinny oraz 20% w osadzie ściekowym. Zawartości substancji organicznej w suchej masie kompostów były następujące: 25,8% – Radiowo; 24,0% – ZUSOK; 42,8% – roślinny oraz 74,4% w osadzie ściekowym.

Całkowita zawartość azotu była najmniejsza (4,6 gN/dm³) w dawce kompostu roślinnego. Nieco większe ilości azotu zawierały dawki kompostów z Radiowa (5,2 gN/dm³) i ZUSOK (5,0 gN/dm³). Najwięcej azotu (11,0 gN/dm³) wprowadzono z osadem ściekowym (tab. 1, 2).

Minimalne i maksymalne sumy plonów suchej masy roślin w roku 2013 z trzech poziomów nawożenia wyniosły (tab. 3):

- 236,2–361,6 g/m² – w wariantach NPK;
- 423,4–714,7 g/m² – w wariantach kompost Radiowo;
- 553,3–1188,4 g/m² – w wariantach kompost Complex;
- 310,2–516,3 g/m² – w wariantach kompost roślinny;
- 257,1–417,2 g/m² – w wariantach kompost ZUSOK;
- 224,5–605,1 g/m² – w wariantach osad ściekowy.

Plony w roku 2013 były znacznie mniejsze niż w roku 2012 (tab. 3). Przyczyny tego stanu upatruje się w niestosowaniu uzupełniającego nawożenia w kolejnym trzecim roku oraz wskutek znacznego niedoboru opadów atmosferycznych. Sumaryczne plony suchej masy roślin w latach 2005–2013 ilustruje tabela 4.

W roku 2005 plony roślin były największe w wariantach kompost roślinny (313–548 g/m²) i kompost ZUSOK (323–573 g/m²). Plony roślin w wariantach osad ściekowy wyniosły 346–412 g/m². Plony wariantu kompost Radiowo w roku 2005 były zbliżone (114–185 g/m²) do wariantu NPK (136–172 g/m²), ale sumaryczne plony z lat 2005–2013 były dużo większe (2486–2640 g/m²) w wariantach kompost Radiowo niż w wariantach NPK (1701–1973 g/m²). Plonotwórcza efektywność kompostu ZUSOK (1810–2436 g/m²) w latach 2005–2013 była mniejsza niż kompostu Radiowo (2383–2640 g/m²).

Sumaryczne plony roślin (lata 2005–2013) w wariantach kompost Radiowo (2383–2640 g/m²) był bliski plonowi w wariantach kompost roślinny (2397–2626 g/m²), mimo że w roku 2005 wielkości plonów różniły się wielokrotnie na korzyść wariantu z kompostem roślinnym (odpowiednio 114–185 i 313–548 g/m²). Sumaryczny plon roślin wariantu osad ściekowy był dużo mniejszy (2010–3587 g/m²) od rekultywacyjnego (plonotwórczego) potencjału komunalnych osadów ściekowych na złożach odpadów paleniskowych [Kozłowska 1995, 1997; Siuta 1998, 2002; Siuta i in. 1988, 1993, 1996; Siuta, Kutla 2005].

Dotyczy to również wielu innych glebotwórczych składowisk odpadów, zwałowisk nadkładu w górnictwie odkrywkowym oraz różnych innych bezglebowych gruntów. Pierwsze rekultywacyjne zastosowanie osadu ściekowego zrealizowano na gruncie antropogenicznym ukształtowanym z piasku dna morskiego pod budowę Portu Północnego w Gdańsku [IUNG 1973; Siuta 1974]. Na dużą skalę osady ściekowe stosowano w biologicznej (roślinnej) rekultywacji gruntu (złoża) wapna poflotacyjnego w kopalni siarki „Jeziórko” [Siuta, Jońca 1997; Siuta, Żukowski 2012].

Porównanie stanu roślin na doświadczalnych złożach odpadów paleniskowych nawożonych kompostami i osadami ściekowymi w latach 2005–2013 ilustrują fotografie 1–5.

Oryginalny sposób zastosowania płynnego osadu ściekowego i roślinnego do utrwalania powierzchni zwałowiska zewnętrznego Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów w drodze lotniczego rozdeszczowywania osadu z nasionami roślin – głównie mieszanki traw przedstawiają fotografie 6–10. Pilotowo-wdrożeniowe doświadczenia osadowo-roślinnego siewu nasion przeprowadzono na skarpie wkopu odkrywkowej kopalnianej [Siuta i in. 1988]. Na tej podstawie opracowano lotnicze rozdeszczowywanie mieszaniny nasion z płynnym osadem ściekowym oraz zbudowano lot-

nisko i powołano Przedsiębiorstwo lotnicze PCS „AVIAECO” Co. Lit. [Siuta i in. 1988, 2013]. Roślinność i zagospodarowanie zwałowiska zewnętrznego KWB Bełchatów imponuje swym ogromem i szatą roślinną [Siuta i in. 2013].

Komunalny osad ściekowy zastosowano też w biologicznej rekultywacji gruntu ukształtowanego technicznie z wapna po flotacji rudy siarkowej na terenie niecek osiadania Kopalni Siarki „Jeziórko” (fot. 11–13).

Największym obiektem rekultywacyjnego zastosowania osadu ściekowego jest składowisko wapna posodowego w Janikowie o ponad 100 hektarowej powierzchni. Po 13 latach od rozpoczęcia rekultywacji składowiskowego gruntu przeprowadzono kompleksowe badania pod tytułem „Rozwój szaty roślinnej i gleby na składowisku odpadów posodowych w Janikowie w latach 2000–2013” [Siuta, Sienkiewicz, Dyguś 2013] (fot. 14–19).

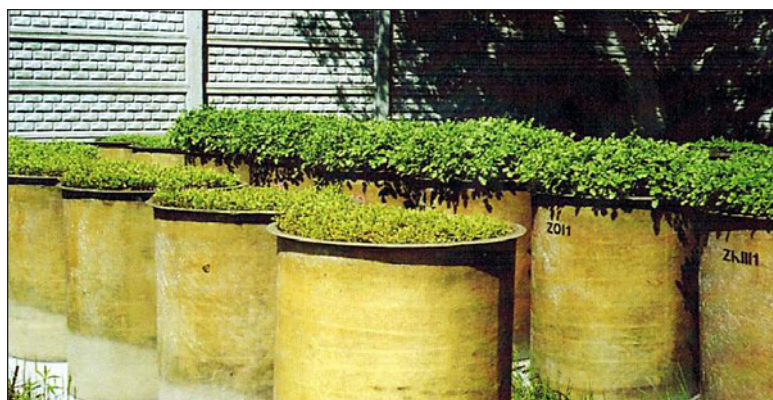
I. Rekultywacyjna efektywność osadu ściekowego na popiołowym złożu I. Reclamation efficiency of sewage sludge on ash deposits



Fot. 1. Trawa na złożu odpadów paleniskowych, zdeponowanych w wyrobisku odkrywkowym na peryferiach Łodzi, w drugim roku po zastosowaniu osadu ściekowego i wysianiu nasion

Photo 1. Grass on coal combustion waste deposited in an opencast working in the peripheral area of Łódź in the second year following the use of sewage sludge and seeding.

II. Rekultywacyjna efektywność kompostów, osadu ściekowego i NPK (bez nawożenia organicznego) w doświadczeniu modelowym II. Reclamation efficiency of composts, sewage sludge and NPK (with no organic fertilization) in the model experiment



Fot. 2. Plonotwórcze działanie kompostów w pierwszym roku doświadczenia (2005 r.).

Na planie pierwszym kompost z Radiowa, na planie drugim kompost roślinny

Photo 2. Yield-forming effect of composts in the first year (2005) of the experiment. In the foreground – compost from Radiowo, in the background – plant compost



Fot. 3. Panujący stulizj lekarski (*Sisymbrium officinale*) w modelu nawożonym kompostem z odpadów komunalnych Radiowo (30 maja 2012 r.)

Photo 3. Prevailing hedge mustard (*Sisymbrium officinale*) in the model fertilized with municipal waste compost of Radiowo (May 30th, 2012)



Fot. 4. Dominacja komosy białej (*Chenopodium album*) w modelu nawożonym kompostem roślinnym (30 maja 2012 r.)

Photo 4. Dominant fat-hen (*Chenopodium album*) in the model fertilized with plant compost (May 30th, 2012)



Fot. 5. Nawłoc późna (*Solidago gigantea*) dominuje w modelu z osadem ściekowym (30 maja 2012 r.)

Photo 5. Early goldenrod (*Solidago gigantea*) prevails in the model with sewage sludge (May 30th, 2012)

III. Rekultywacyjna efektywność płynnego osadu ściekowego rozdeszczowywanego wraz z nasionami roślin w Kopalni Węgla Brunatnego „Bełchatów”
[Siuta, Żukowski 2008, 2012]

III. Reclamation efficiency of a liquid sewage sludge sprinkled together with plant seeds in “Bełchatów” Lignite Mine [Siuta, Żukowski 2008, 2012]



Fot. 6. Rozdeszczowywanie osadu ściekowego z nasionami trawy
Photo 6. Sprinkling of sewage sludge mixed with grass seeds



Fot. 7. Zwarta (darniowa) roślinność skutecznie chroni powierzchnię skarpy przed erozją
Photo 7. Compact (turf) vegetation effectively protects the surface of the slope from erosion



Fot. 8. Erozyjne przemieszczenie masy ziemnej na przedpole zwalowiska
Photo 8. Erosive displacement of ground mass towards the foreground of the spoil tip



Fot. 9. Samolot przedsiębiorstwa lotniczego przystosowany do osadowego hydrosiewu roślin, widziany z utrwalonej roślinie powierzchni zwałowiska

Photo 9. Aircraft of an aviation company with the equipment for hydroseeding with sewage sludge, view from the spoil tip's surface strengthened with vegetation cover



Fot. 10. Zwałowisko zewnętrzne (zwane belchatowską górą) imponuje swym ogromem i szatą roślinną

Photo 10. External spoil tip (referred to as “belchatowska góra” (the Mountain of Belchatów) with its impressive size and vegetation cover

IV. Rekultywacyjna efektywność osadu ściekowego na gruncie wapna poflotacyjnego w Kopalni Siarki „Jeziórko” [Siuta 1998, 2002]

IV. Reclamation efficiency of sewage sludge on post-flotation lime ground in “Jeziórko” Sulphur Mine [Siuta 1998, 2002]



Fot. 11. Zawodniona niecka osiadania
Photo 11 Water-filled subsidence basin



Fot. 12. Zawodniona niecka osiadania zabezpieczona wapnem poflotacyjnym – techniczna rekultywacja gruntu

Photo 12. Water flooding subsidence basin filled with post-flotation lime – technical ground reclamation



Fot. 13. Trawa na gruncie z wapna poflotacyjnego użyżnionym osadem ściekowym

Photo 13. Grass on the post-flotation lime soil fertilized with sewage sludge

V. Rekultywacyjna efektywność osadu ściekowego na składowisku odpadów posodowych w Janikowie [Siuta 2002; Siuta, Sienkiewicz, Dyguś 2013]

V. Reclamation efficiency of sewage sludge on post-sodium waste landfill in Janikowo [Siuta 2002; Siuta, Sienkiewicz, Dyguś 2013]



Fot. 14. Powierzchnia stawu osadowego nr 3 na tle Janikosody w kwietniu 2000 r.

Photo 14. Settling pond surface no. 3 in front of Janikosoda, April 2000



Fot. 15. Niemal zupełnie bezroślinna powierzchnia złoża (bez osadu ściekowego) kontrastuje z bujną roślinnością na gruncie użyźnionym osadem ściekowym
Photo 15. Surface of the deposit (without sewage sludge), with almost nonexistent vegetation cover, contrasts with an abundant vegetation of the ground fertilized with sewage sludge



Fot. 16. Panorama roślinności niskiej i drzewiastej na tle Janikosody
Photo 16. Panoramic view of low vegetation and trees in front of Janikosoda



Fot. 17. Koszenie i siewkowanie roślin
Photo 17. Cutting down and chopping the grass



Fot. 18. Pryzmowanie skoszonej masy roślinnej
Photo 18. Piling of the cut plant mass



Fot. 19. Doświadczalne kompostowanie masy roślinnej z wapnem posodowym
Photo 19. Experimental composting of plant mass with post-sodium lime

PIŚMIENNICTWO

1. Biernacka E. 1976. Wpływ biologicznej rekultywacji składowisk odpadów paleniskowych na niektóre procesy glebowe i skład chemiczny roślin. Rozprawa habilitacyjna, Zesz. Nauk. SGGW AR, Warszawa, nr 86.
2. Dyguś K. H., Madej M. 2012. Roślinność wielovariantowego doświadczenia modelowego na złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Inżynieria Ekologiczna Nr 30, 227–240.
3. Dyguś K. H., Sienkiewicz J. 2014. Roślinność na składowisku odpadów posodowych w Janikowie po 13 latach rekultywacji. Inżynieria Ekologiczna Nr 36, 65–97.
4. Dyguś K. H., Siuta J., Wasiak G., Madej M. Roślinność składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. Wyd. Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania, Warszawa, 134 s.
5. Dyguś K. H., Wasiak G., Madej M. 2014. Dynamika zmian roślinności w doświadczeniu modelowym ze złożem odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Inżynieria Ekologiczna Nr 40, 100–121.
6. Gilewska M., Przybyła Cz. 2011. Wykorzystanie osadów ściekowych w rekultywacji składowisk popiołowych. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. PAN, 477, 217–222.
7. Hryncewicz J., Balicka N., Giedrojc B., Małysowa E. 1972. Badania nad utrwalaniem i zagospodarowaniem hałdy popiołowej w elektrowni „Halemba”. XIX Zjazd Naukowy PTGleb., Puławy.
8. IUNG. 1973. Projekt rekultywacji gruntów oraz urządzenia zieleni w Porcie Północnym [Siuta 1974; Siuta i in. 2013].
9. Kaładkowska M., Borysewicz J. 1994. Ekogel MI – nowy preparat do stabilizacji i rekultywacji składowisk pylistych odpadów przemysłowych. Ochrona Powietrza 2, 48–50.

10. Kozłowska B. 1995. Zastosowanie osadów ściekowych do biologicznego zagospodarowania składowisk odpadów paleniskowych. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., PAN, z. 418, 859–868.
11. Kozłowska B. 1997. Zastosowanie osadów ściekowych do roślinnego zagospodarowania składowisk odpadów paleniskowych. Rozprawa doktorska IPIŚ PAN w Zabrze: 80 s. i dokumentacja fotograficzna.
12. Maciak F., Liwski S., Biernacka E. 1976a. Rekultywacja rolnicza składowisk odpadów paleniskowych (popiołów) z węgla brunatnego i kamiennego. Cz. I. Wzrost roślinności na składowiskach popiołu w zależności od zabiegów agrotechnicznych i nawozowych. Roczn. Glebozn. t. XXVII, z. 4, 149–169.
13. Maciak F., Liwski S., Biernacka E. 1976b. Rekultywacja rolnicza składowisk odpadów paleniskowych (popiołów) z węgla brunatnego i kamiennego. Cz. II. Skład chemiczny roślin ze składowisk po węgla brunatnym i kamiennym, Roczn. Glebozn. XXVII, 4, 171–187.
14. Madej M. 2007. Zieleń miejska źródłem surowca do produkcji kompostu. Praca doktorska, WSEiZ, Warszawa; 140 s.
15. Opaliński R. 2007. Rekultywacyjna efektywność kompostu Complex na odpadach paleniskowych w doświadczeniu lizymetrycznym. Praca magisterska. WSEiZ, Warszawa: 78 s.
16. Rosik–Dulewska Cz. 1980. Rozwój roślin uprawnych na składowiskach popiołu z elektrowni Halimba i ich ocena jakościowa. Rozprawa doktorska AR we Wrocławiu.
17. Siuta J. 1974. Kształtowanie przyrodniczych warunków rolnictwa a Polsce. PWN, Warszawa: 357 s.
18. Siuta J. 1998. Rekultywacja gruntów. Poradnik IOŚ, Warszawa: 204 s. + 100 fot.
19. Siuta J. 1999. Rekultywacyjna efektywność kompostu z Radiowa. [W:] Kompostowanie i użytkowania kompostów, Warszawa-Puławy: 37-54 + 24 fot.
20. Siuta J. 2002. Przyrodnicze użytkowanie odpadów. IOŚ, Warszawa: 87 s.
21. Siuta J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. Acta Agrophysica, 2005, 5(2), 417–425.
22. Siuta J., Dyguś K. H. 2013. Plony i chemizm roślin wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Inżynieria Ekologiczna Nr 35, 7–31.
23. Siuta J., Jońca M. 1997. Rekultywacyjne działanie osadu ściekowego na wapnie poftotacyjnym w kopalni siarki Jeziorko. [W:] Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych, Puławy-Lublin-Jeziorko, 39–46.
24. Siuta J., Kutla 2005. Rekultywacyjne działanie osadów ściekowych na złożach odpadów paleniskowych w energetyce węglowej. Inżynieria Ekologiczna Nr 10, 58–69.
25. Siuta J., Pasińska C., Wasiak G. i in. 1988. Przyrodnicze zagospodarowanie osadów ściekowych. PWN, Warszawa, 357 s.
26. Siuta J., Sienkiewicz J., Dyguś K. 2013. Rozwój szaty roślinnej i gleby na składowisku odpadów posodowych w Janikowie w latach 2000-2013. Monografia, IOŚ-PIB, Warszawa, 172 s. + 97 fot.
27. Siuta J., Wasiak G. 2000. Kompostowanie i użytkowanie kompostu. Monografia, Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 60 s.
28. Siuta J., Wasiak G., Kozłowska B. 1993. Agrotechniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. Cz. 2. Roślinne zagospodarowanie bezglebowych gruntów użyźnionych osadem ściekowym. Ekol. i Techn. 4, 10–14.
29. Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K., Mamełka D. 1996. Rekultywacyjna efektywność osadu ściekowego na bezglebowych podłożach w doświadczeniu lizymetrycznym. [W:] Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych, Puławy-Lublin-Jeziorko: 135–154.
30. Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K., Jońca M., Mamełka D., Sułek S. 1996. Przyrodniczo-techniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. IOŚ, Warszawa, 40 s.
31. Siuta J., Wasiak G., Madej M. 2008. Rekultywacyjna efektywność kompostów i osadu ściekowego na złożu odpadów paleniskowych w doświadczeniu modelowym. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 34, 145–172 + 26 fot.
32. Siuta J., Żukowski B. 2008. Degradacja i rekultywacja powierzchni ziemi w Polsce. IOŚ, Warszawa, 238 s. + dokumentacja fotograficzna i mapowa.
33. Siuta J., Żukowski B. 2012. Rekultywacja i zagospodarowanie gruntów pogórnich w Polsce. Monografia IOŚ-PIB, Warszawa, 149 s. + 81 fot.
34. Wójcik A. A. 2007. Rekultywacyjna efektywność kompostu ZUSOK na odpadach paleniskowych w doświadczeniu lizymetrycznym. Praca magisterska, WSEiZ, Warszawa, 65 s.
35. Wysocki W. 1984. Reclamation of Alkalien Ask Piles USEPA Cincinnati. Ohio.
36. Wysocki W. 1988. Rekultywacja składowisk odpadów elektrowni węglowych. Sozologia i Sozotecnika, 26, 231–240.
37. Żak M. 1972. Wpływ powłok asfaltowych przeciwdziałających wtórnemu pyleniu składowisk popiołów lotnych na wegetację roślin. XIX Zjazd Naukowy PTGleb., Puławy.
38. Żak M. 1994. Przyczyny i sposoby przeciwdziałania pyleniu popiołów lotnych na składowiskach. Ochrona Powietrza 1, 19–22.