

**KAZIMIERZ HENRYK DYGUŚ**

Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania, Wydział Inżynierii i Zarządzania, ul. Olszewska 12,  
00-792 Warszawa, e-mail: [dygus@wseiz.pl](mailto:dygus@wseiz.pl)

**ROŚLINNOŚĆ WIELOLETNIEGO DOŚWIADCZENIA  
NA MODELOWYM ZŁOŻU ODPADÓW PALENISKOWYCH  
ENERGETYKI WĘGLOWEJ. CZĘŚĆ III**

*W latach 2011-2016 prowadzono ocenę udziału roślin w rekultywacji złoża odpadów paleniskowych energetyki węglowej użyźnionego czterema rodzajami kompostów i osadem ściekowym. Złoże odpadów paleniskowych przygotowano w wazonach. Corocznie w okresie wegetacyjnym oceniano ilościowo-jakościowy stan i plonowanie roślin zasilonych substancjami użyźniającymi. Wykazano wysokie bogactwo gatunkowe roślin o znacznej biomasie. Stwierdzono wysoką efektywność rekultywacyjną złoża odpadów paleniskowych w większości wariantów nawożenia. Biologiczna rekultywacja składowisk odpadów paleniskowych z wykorzystaniem złóż glebotwórczych i roślinności, jest coraz powszechniej stosowana i udoskonalana. W tym celu przeprowadzono wiele badań eksperymentalnych (modelowych, lizymetrycznych, polowych), a jednym z nich jest tutaj zaprezentowane doświadczenie.*

**Słowa kluczowe:** rekultywacja biologiczna, roślinność, odpad paleniskowy, kompost, osad ściekowy

**I. WSTĘP**

Modelowe złoże doświadczenia ukształtowano w pojemnikach cylindrycznych i użyżniono wariantowo 4 rodzajami kompostu, osadem ściekowym i mieszanką mineralną NPK. Rośliny wysiano w 2005 r. a ich plony zebrano w latach 2005 i 2006 oraz 2011-2016. W latach 2007-2010 nie nawożono i nie uzupełniano niedoboru wody. Czyniono natomiast obserwacje. Wyniki badań stanowiły podstawę inżynierskich i magisterskich prac dyplomowych oraz publikacji naukowych [Siuta 2005, Siuta i in. 2008, Siuta i Dyguś 2013, Siuta i Dyguś 2015, Dyguś i Madej 2012, Dyguś i in. 2014]. Stan roślinności w latach 2011 i 2012 opublikowali Dyguś i Madej [2012]. Ocenę rozwoju szaty roślinnej na gruncie wapiennym i popiołowym, zrekultywowanym przy użyciu osadu ściekowego, zbadano i opisano w publikacji monograficznej [Siuta i in. 2013].

Glebotwórcza (w tym rekultywacyjna) i nawozowa użyteczność komunalnych osadów ściekowych jest bardzo duża i dobrze znana, ale często wadliwie stosowana w rolnictwie. Skład chemiczny osadów ściekowych to skoncentrowany nawóz organiczny, zasobniejszy w organiczne i mineralne składniki nawozowe od najlepszych kompostów. Ale ze względu na półpłynną i mazistą konsystencję oraz obecność chorobotwórczych organizmów i nadmierną zawartość niepożądanych chemikaliów może być niewskazany do nawożenia

---

**DOI: 10.15584/pjdsd.2016.20.6**

gleb uprawnych. Rekultywacyjne (glebotwórcze) stosowanie osadów ściekowych nie jest w tak dużym stopniu ograniczone jak w nawożeniu gleb uprawnych, zwłaszcza gdy zrekultywowany grunt nie jest przeznaczony do uprawy roślin jadalnych i paszowych. Z tego też względu wprowadzono odpowiednio szersze pojęcie „przyrodnicze użytkowanie (stosowanie) osadów ściekowych”.

Pierwsze, rekultywacyjne zastosowanie osadu ściekowego na dużą skalę miało miejsce w ukształtowaniu gleby i szaty roślinnej w Porcie Północnym na gruncie zbudowanym z piasku dna morskiego [Siuta i in. 1973, Siuta i in. 1988]. Największe rekultywacyjne zadanie z zastosowaniem osadu ściekowego wykonano na składowisku odpadów posodowych w Janikowie [Siuta i in. 2013]. Bardzo duża porowatość popiołu czyni go pojemnym względem wody kapilarnej. Alkaliczny odczyn popiołu jest w dużym stopniu neutralizowany i buforowany przez osad ściekowy, w tym CO<sub>2</sub> wytwarzany w procesie biochemicznej przemiany osadowej materii organicznej. Z powyższych względów mieszanka popioło-osadowa szybko przemienia się w biologicznie czynne złożo. Glebotwórczy potencjał złoża (gruntu) popiołowego jest więc wyjątkowo duży:

- w doświadczeniach modelowych [Siuta i in. 1988, Kozłowska 1995, Siuta i in. 1996],
- w doświadczeniach łanowych [Maciak 1978, Siuta i in. 1996, Kozłowska 1997],
- w rekultywacji wdrożeniowej na składowiskach odpadów [Biernacka 1976, Maciak i in. 1976, Maciak i in. 1979, Siuta 2007, Siuta i in. 2013].

Celem badań była ocena efektywności rekultywacyjnej kilku rodzajów substancji używających na doświadczalnym złożu odpadów paleniskowych. Cel realizowano w oparciu o oszacowany plon roślin, bogactwo florystyczne, procentowe pokrycie gatunków oraz ich właściwości ekologiczne.

## II. METODYKA

Wielowariantowe doświadczenie biologicznej rekultywacji modelowego gruntu, ukształtowanego z popiołu lotnego energetyki węglowej wykonano w pojemnikach (lizymetrach) cylindrycznych wysokości 100 cm o średnicy 80 cm (0,5 m<sup>2</sup> powierzchni) z przydennym odpływem. 52 lizymetry zbudowano z włókna szklanego i żywicy syntetycznej w celu przeprowadzenia wielowariantowego doświadczenia w programie badawczym finansowanym przez KBN pt. „Przyrodniczo-techniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost”, zrealizowanym przez Instytut Ochrony Środowiska [Siuta i in. 1996a, Siuta i in. 1996b]. W ramach tego programu testowano rekultywacyjną efektywność osadu ściekowego na modelowych gruntach: popiołu energetyki węglowej, wapna z flotacji rudy siarkowej i bezglebowego piasku. W roku 2005 lizymetryczne pojemniki przekazano Wyższej Szkole Ekologii i Zarządzania w Warszawie, które zapełniono popiołem lotnym z Elektrociepłowni Kawęczyn. Do modelowego gruntu popiołowego wprowadzono wariantowo 4 rodzaje kompostu, mazisty osad ściekowy oraz, jako obiekt odniesienia, nawóz mineralny NPK w trzech różnych dawkach. Każdy wariant nawozowy miał 3 powtórzenia. Schemat doświadczenia i rekultywacyjne dawki nawozów przedstawia tabela 1, a zawartości składników w poszczególnych nawozach tabela 2 [Madej 2007, Opaliński 2007, Siuta i in. 2008, Madej i in. 2010].

W sezonach wegetacyjnych III etapu doświadczenia (lata 2014-2016) prowadzono szczegółowe obserwacje florystyczne. Notowane gatunki roślin poddano analizie florystyczno-fitosocjologicznej i taksonomicznej. Natomiast analizę ekologiczną gatunków przedstawiono w innej publikacji [Dyguś 2015]. Dynamikę zmian roślin w pojemnikach wielowariantowego doświadczenia wyrażono procentowym udziałem pokrycia roślin w poszczególnych modelach doświadczalnych. Na podstawie składu gatunkowego roślin wyodrębniono ich grupy

systematyczne, syntaksonomiczne, ekologiczne, geograficzno-historyczne i formy życiowe. Przez ostatnie sześć lat eksperymentu, comiesięcznie każdego okresu wegetacyjnego, inwentaryzowano gatunki i określano ich procentowe pokrycie.

**Tabela 1 / Table 1**

Rekultywacyjne dawki nawozów / *Reclamation doses of fertilisers*

Wprowadzane substancje / <i>Substances introduced</i>	Dawki / <i>Doses</i>					
	dm <sup>3</sup> /0,5 m <sup>2</sup>			m <sup>3</sup> /ha		
Osad ściekowy / <i>Sewage sludge (O)</i>	5,0	10,0	15,0	100	200	300
Kompost roślinny / <i>Plant compost (kr)</i>	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost Radiowo / <i>Radiowo compost (kRa)</i>	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost ZUSOK / <i>ZUSOK compost (kZ)</i>	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Kompost Complex / <i>Complex compost (kC)</i>	5,0	7,5	10,0	100	150	200
NPK	g/0,5 m <sup>2</sup>			kg/ha		
Azot / <i>Nitrogen (N)</i>	7,5	10,0	12,5	150	200	250
Fosfor/ <i>Phosphorus (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</i>	3,5	4,5	6,0	70	90	120
Potas / <i>Potassium (K<sub>2</sub>O)</i>	5,0	7,5	10,0	100	150	200
Razem / <i>Total NPK</i>	16,0	22,0	28,5	320	440	570

**Tabela 2 / Table 2**

Właściwości nawozów organicznych zastosowanych w doświadczeniu / *Properties of organic fertilisers applied in the experiment*

Zawartości / <i>Contents</i>	Rodzaj nawozu / <i>Type of fertilizer</i>				
	(kRa)	(kr)	(kZ)	(kC)	(O)
Subst. org. s.m. / <i>Organic subst. in d.m.%</i>	25,8	42,8	24,0	74,4	37,7
Węgiel org. s.m. / <i>Organic carbon in d.m.%</i>	12,8	19,3	11,9	39,2	21,2
Azot s.m. / <i>Nitrogen in d.m.%</i>	1,1	2,1	1,0	5,8	1,4
Fosfor s.m. / <i>Phosphorus in d.m.%</i>	0,6	0,8	0,5	1,5	0,6
Potas s.m. / <i>Potassium in d.m.%</i>	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 / <i>Fresh substances g/dm<sup>3</sup></i>	807	330	790	950	490
Masa sucha / <i>Dry substances g/dm<sup>3</sup></i>	472	219	504	185	350
Woda / <i>Water %</i>	40,1	31,7	36,9	80,9	40
Azot / <i>Nitrogen gN/dm<sup>3</sup></i>	5,2	4,6	5,0	11,0	n.o.

kRa - Kompost Radiowo / *Radiowo compost*; kr - Kompost roślinny / *Plant compost*; kZ - Kompost ZUSOK / *ZUSOK compost*; kC - Kompost Complex / *Complex compost*; O - Osad ściekowy / *Sewage sludge*; n.o. - nie oznaczono / *not determined*

W latach 2005 i 2006 oraz w latach 2011-2014 trzykrotnie w danym roku zbierano plony roślin, a w latach 2015 i 2016 zebrano dwukrotnie. Zebraną biomasa roślinną suszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 75°, aż do uzyskania suchej masy, a następnie ważono z dokładnością do 0,0001 g.

Dane taksonomiczne opracowano według „Klucza do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej” [Rutkowski 1998]. Nomenklaturę jednostek grup syntaksonomicznych zastosowano według Matuszkiewicza [2001]. Klasyfikację i udział form życiowych flory opracowano według Raunkiaera [Zarzycki i in. 2002]. Analizę geograficzno-historyczną roślin przeprowadzono na podstawie opracowań Rutkowskiego [1998] oraz Mirka i in. [2002]. Średnie pokrycie roślin w poszczególnych modelach nawożenia wyrażono skalą Braun-Blanqueta (1964) z uwzględnieniem modyfikacji Westhoffa i van der Maarela (1978). Nazewnictwo łacińskie roślin naczyniowych przyjęto według Mirka i in. [2002].

### III. WYNIKI I DYSKUSJA

*Plonowanie roślin na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej*

Plony suchej masy roślin (w g/m<sup>2</sup>) ze wszystkich wariantów nawożenia podczas eksperymentu ilustruje tabela 3.

Wyniki wykazują spadek plonów w III etapie badań (lata 2014-2016) w odniesieniu do dwóch poprzednich etapów (lata 2005-2006 i 2011-2013).

**Tabela 3 / Table 3**

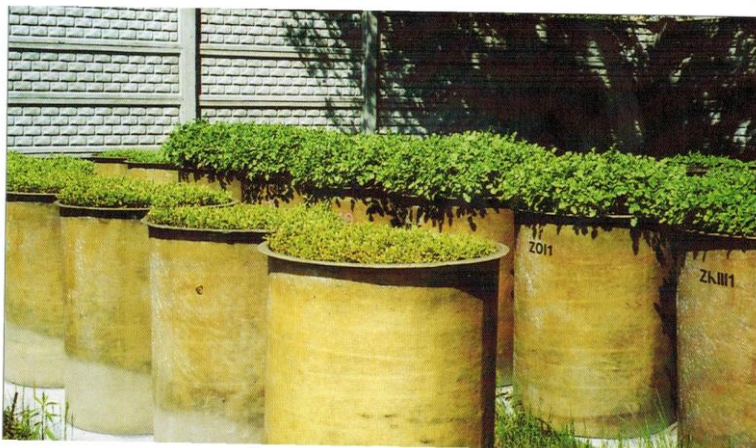
Plony suchej masy roślin (w g/m<sup>2</sup>) w latach 2005-2016 / *Dry matter yield of plants (g/m<sup>2</sup>) in the period 2005-2016*

Dawka nawozu <i>Fertilizer dose</i>	L a t a / Y e a r s*								Σ
	2005	2006	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
<i>N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O (NPK)</i>									
32 g	172	73	860	432	299	265	208	145	2454
44 g	136	214	784	522	317	314	263	211	2761
57 g	161	311	427	504	298	214	177	248	2340
<i>Kompost Radiowo / Radiowo compost (kR)</i>									
10 dm <sup>3</sup>	114	230	911	687	544	530	324	220	3560
15 dm <sup>3</sup>	185	216	905	611	466	504	480	396	3763
20 dm <sup>3</sup>	184	214	835	751	656	478	412	267	3797
<i>Kompost Complex / Complex compost (kC)</i>									
10 dm <sup>3</sup>	0	256	1024	985	1021	659	519	267	4731
15 dm <sup>3</sup>	0	406	1077	826	674	807	696	554	5040
20 dm <sup>3</sup>	0	582	1735	1077	960	1044	808	314	6520
<i>Kompost roślinny / Plant compost (kr)</i>									
10 dm <sup>3</sup>	313	296	682	625	481	257	209	156	3059
15 dm <sup>3</sup>	436	326	887	442	323	345	311	260	3330
20 dm <sup>3</sup>	548	366	901	427	384	287	216	154	3283
<i>Kompost ZUSOK / ZUSOK compost (kZ)</i>									
10 dm <sup>3</sup>	323	257	318	575	337	246	179	145	2380
15 dm <sup>3</sup>	413	317	389	539	334	367	301	226	2886
20 dm <sup>3</sup>	573	347	572	607	337	412	333	176	3357
<i>Osad ściekowy / Sewage sludge (O)</i>									
10 dm <sup>3</sup>	346	355	416	578	415	328	265	148	2851
15 dm <sup>3</sup>	380	374	1103	721	545	587	410	227	4347
20 dm <sup>3</sup>	412	694	1285	652	544	443	345	206	4581

\* – doświadczenie zapoczątkowano w 2006 r. / *experiment was initiated in 2006*

Głównym czynnikiem spadku plonów był niedobór wody. Podobne zjawisko obserwowana na powierzchniach zrekułtywowanego składowiska odpadów posodowych w Janikowie [Siuta i in. 2013].

Rekułtywacyjna efektywność kompostów badana była w ramach wielowariantowych doświadczeń modelowych na złożach popiołowych z energetyki węglowej (rys. 1 i 2) [Siuta i in. 2008, Siuta i Dyguś 2015].



**Rys. 1.** Plonotwórcze działanie kompostów w pierwszym roku doświadczenia (2005 r.). Na planie pierwszym kompost z Radiowa, na planie drugim kompost roślinny

**Fig. 1.** Yield-forming effect of composts in the first year (2005) of the experiment. In the foreground – compost from Radiowo, in the background – plant compost



**Rys. 2.** Panujący stulisz lekarski (*Sisymbrium officinale*) w modelu nawożonym kompostem z odpadów komunalnych Radiowo (30 maja 2012 r.)

**Fig. 2.** Prevailing hedge mustard (*Sisymbrium officinale*) in the model fertilized with municipal waste compost of Radiowo (May 30<sup>th</sup>, 2012)

Rekultywacyjną efektywność osadu ściekowego na popiołowym złożu wykazano w wielu obiektach. Przykładem jest zrekultywowane wyrobisko odkrywkowe koło Łodzi pokryte roślinnością trawiastą (rys. 3) oraz zrekultywowane składowiska odpadów posodowych w Janikowie (rys. 4) [Siuta i in. 2013].



**Rys. 3.** Trawa na złożu odpadów paleniskowych, zdeponowanych w wyrobisku odkrywkowym na peryferiach Łodzi, w drugim roku po zastosowaniu osadu ściekowego i wysianiu nasion

*Fig. 3. 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.*



**Rys. 4.** Roślinność na składowisku odpadów posodowych w Janikowie

*Fig. 4. Vegetation on the soda waste disposal site at Janikowo*

#### *Rozwój roślinności na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej*

W latach 2011-2016 w pojemnikach stwierdzono 87 gatunków roślin, spośród nich 82 to gatunki zasiedlone spontanicznie. W tabeli 4 przedstawiono stan bogactwa florystycznego wraz z oceną pokrycia gatunków notowanych w ostatnim (2016) roku obserwacji.

Bogactwo florystyczne za lata 2011-2013 przedstawiono w innych opracowaniach [Dyguś i Madej 2012, Dyguś i in. 2014]. Skład florystyczny wraz z pokryciem roślin okazał się przydatny do oceny efektywności rekultywacyjnej w doświadczalnym złożu. W wielu badaniach dowiedziono, że liczba gatunków i ich pokrycie są ważnymi wskaźnikami możliwości rekultywacyjnych aplikowanej na złożu substancji nawozowej [Gutkowska i Pawluśkiewicz 2006]. Zinventaryzowana w latach 2011-2016 flora należała

do 19 taksonów w randze rodzin, wśród których w pierwszych latach obserwacji dominowały gatunki z rodzin: trawy (*Poaceae*), złożone (*Asteraceae*), komosowate (*Chenopodiaceae*), krzyżowe (*Brassicaceae*).

**Tabela 4 / Table 4**

Bogactwo gatunkowe i pokrycie roślin w doświadczeniu modelowym w 2016 r. / *Species diversity and plant cover in the model experiment in 2016*

Lp.	Gatunek / <i>Species</i>	NPK	kRa	kC	kr	kZ	O
1.	<i>Acer negundo - s</i>	+	+	+			
2.	<i>Achillea millefolium</i>				+	+	1
3.	<i>Agrostis stolonifera</i>	+		+	+	+	+
4.	<i>Anthriscus sylvestris</i>				+		+
5.	<i>Artemisia vulgaris</i>	+	+	1	1	+	+
6.	<i>Atriplex patula</i>				+		
7.	<i>Atriplex prostrata</i>				+		
8.	<i>Atriplex tatarica</i>				+	+	
9.	<i>Bidens frondosa</i>	+	1	+		1	+
10.	<i>Bidens tripartita</i>	+	1	+	+	+	+
11.	<i>Calamagrostis epigejos</i>	+		+			
12.	<i>Capsella bursa-pastoris</i>		+	1	+	+	1
13.	<i>Chamomilla recutita</i>					+	
14.	<i>Chenopodium album</i>	2a	2a	2a	2a	2a	2a
15.	<i>Chenopodium glaucum</i>			+		+	
16.	<i>Chenopodium hybridum</i>			+	+	+	
17.	<i>Chenopodium murale</i>		1	1		+	+
18.	<i>Chenopodium polyspermum</i>		+	+			
19.	<i>Chenopodium urbicum</i>			+			
20.	<i>Cirsium arvense</i>		+	+	+	+	1
21.	<i>Cirsium oleraceum</i>	+		+	+		
22.	<i>Crisium vulgare</i>	+	+	2m		+	+
23.	<i>Convolvulus arvensis</i>				+		+
24.	<i>Conyza canadensis</i>	1	2m	2a	2m	1	1
25.	<i>Dactylis glomerata</i>		+	+	+	+	+
26.	<i>Daucus carota</i>				+		+
27.	<i>Descurainia sophia</i>	+	+		+	+	1
28.	<i>Elymus repens</i>	+	+	+	+	+	+

29.	<i>Epilobium montanum</i>						+
30.	<i>Erigeron annuus</i>	+				+	
31.	<i>Erigeron ramosus</i>	+		+		+	
32.	<i>Erysimum cheiranthoides</i>					+	1
33.	<i>Fallopia convolvulus</i>				+		
34.	<b><i>Festuca arundinacea</i> var. Starlett</b>	2a	2a	2a	2a	2a	2b
35.	<b><i>Festuca rubra</i> var. Maxima</b>	2a	2m	2a	2a	2a	2a
36.	<i>Geranium pyrenaicum</i>				+		+
37.	<i>Geranium pusillum</i>			r			
38.	<i>Hypochoeris radicata</i>		r				
39.	<i>Impatiens parviflora</i>	2a		2a	+	2a	2m
40.	<i>Lamium maculatum</i>	+		+			+
41.	<i>Lamium purpureum</i>			+			r
42.	<b><i>Lolium perenne</i> var. Stadion</b>	2a	2a	2a	2a	2a	2b
43.	<i>Lotus corniculatus</i>					+	
44.	<i>Lycopus europaeus</i>			+			
45.	<i>Matricaria maritima</i> ssp. <i>inodora</i>	+	+	1	+	+	
46.	<i>Medicago falcata</i>	1	2m	1	+		1
47.	<i>Medicago lupulina</i>	2a	2a	2m	2a	2m	2m
48.	<i>Oxalis fontana</i>					+	1
49.	<i>Phleum pratense</i>	+	+	+	+	+	+
50.	<i>Plantago intermedia</i>	1		+	+	+	+
51.	<i>Plantago lanceolata</i>			+		+	+
52.	<i>Plantago major</i>				+	1	
53.	<i>Poa angustifolia</i>	+	+	+	+		+
54.	<i>Poa annua</i>	+	+	+	+	+	+
55.	<i>Poa compressa</i>	+	+			+	
56.	<b><i>Poa pratensis</i> var. Evona</b>	2a	2a	2b	2a	2b	2b
57.	<i>Polygonum aviculare</i>	+	2a	+	1	1	+
58.	<i>Polygonum lapathifolium</i>				+	+	+
59.	<i>Polygonum persicaria</i>					+	
60.	<i>Quercus robur</i> - s						+
61.	<i>Raphanus raphanistrum</i>		1	+		+	+
62.	<i>Rumex acetosa</i>	1			+	+	



63.	<i>Rumex acetosella</i>		+		+		
64.	<i>Rumex crispus</i>			+	+		
65.	<i>Silene vulgaris</i>						+
66.	<b><i>Sinapis alba</i></b>	r				r	
67.	<i>Sinapis arvensis</i>		+			+	+
68.	<i>Sisymbrium loeselii</i>	1	1	1	+	1	
69.	<i>Sisymbrium officinale</i>		+			+	+
70.	<i>Solidago canadensis</i>	2a	2a	+	2a	1	1
71.	<i>Solidago gigantea</i>	1		+		+	1
72.	<i>Sonchus arvensis</i>	2a	2a	1	2a	2a	2a
73.	<i>Sonchus asper</i>		+	+			
74.	<i>Sonchus oleraceus</i>	+	1	+	+	+	1
75.	<i>Stellaria media</i>	2m		2m	2a	2m	2a
76.	<i>Tanacetum vulgare</i>			r			
77.	<i>Taraxacum officinale</i>	1	2a	1	1	2a	1
78.	<i>Trifolium arvense</i>	2m		2a		1	1
79.	<i>Trifolium dubium</i>				+		
80.	<i>Trifolium hybridum</i>				1	1	+
81.	<i>Trifolium repens</i>	2m	2a	2a	2a	1	1
82.	<i>Tussilago farfara</i>		2m		2m		
83.	<i>Veronica persica</i>						+
84.	<i>Vicia cracca</i>	+		+			+
85.	<i>Vicia hirsuta</i>			+			
86.	<i>Vicia sativa</i>					+	
87.	<i>Viola arvensis</i>			+			

Objaśnienia skrótów / Abbreviations:

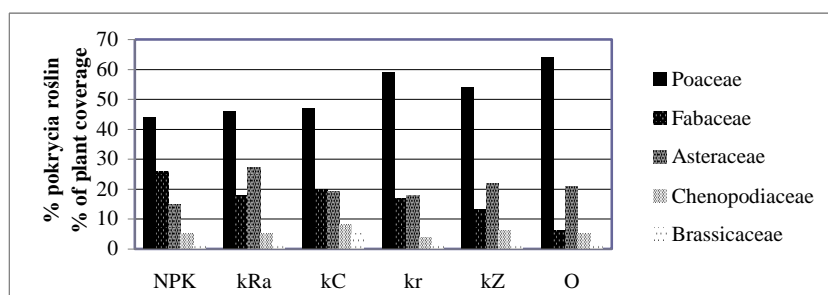
1. r, +, 1, 2a, 2b, 2m - średnie pokrycie roślin w poszczególnych modelach nawożenia wyrażone skalą Braun-Blanqueta (1964) z uwzględnieniem modyfikacji Westhoffa i van der Maarela (1978) / *The average of plant coverage in various models expressed by Braun-Blanquet scale (1964), taking into account the modification by Westhoff and Van der Maarel (1978)*;

2. NPK – nawóz N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O bez nawożenia organicznego, kRa – kompost z odpadów komunalnych Radiowo, kC – kompost Complex, kr – kompost roślinny wyprodukowany z trawy, kZ – kompost z odpadów komunalnych i roślinnych (ZUSOK), O – osad z oczyszczania ścieków komunalnych / *NPK – fertilizer N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O without organic fertilization, kRa – Radiowo compost from municipal waste, kC – Complex compost, kr – plant compost made from grass, kZ – ZUSOK compost made from municipal and plant waste, O – sludge from municipal wastewater treatment*;

3. s – siewka / s – seedling;

Gatunki zaznaczone pismem pogrubionym zostały wysiane w 2011 r. (4 gatunki traw i gorczyca jasna *Sinapis alba*)  
*Species highlighted in bold were sown in 2011 (4 species of grasses and white mustard Sinapis alba).*

W ostatnich latach badań struktura dominacji rodzin uległa częściowo zmianie. Nadal dominowały gatunki z rodziny traw (*Poaceae*), lecz subdominantami okazały się gatunki z rodziny motylkowatych (*Fabaceae*) i rodziny złożonych (*Asteraceae*) (rys. 5). Wiąże się to z przewagą anemochorów w tych rodzinach, które produkują duże ilości lekkich, lotnych nasion, co umożliwia ich rozsiew na znaczne odległości. Do najliczniej reprezentowanych rodzajów botanicznych należą: komosa (*Chenopodium*), rdest (*Polygonum*), mlecz (*Sonchus*), wiechlina (*Poa*), łoboda (*Atriplex*), koniczyna (*Trifolium*), babka (*Plantago*). Jest to typowy udział taksonów botanicznych w procesie spontanicznego kształtowania się pokrywy roślinnej w początkowych etapach rekultywacji składowisk przemysłowych i komunalnych [Gutkowska i Pawluśkiewicz 2006, Rostański 2006, Dyguś i in. 2012].



Rys. 5. Procentowy udział dominujących rodzin tworzących pokrywę roślinną w doświadczeniu  
 Fig. 5. Percentage share of dominating families creating the plant cover in the experiment

Analiza fitosocjologiczna i syntaksonomiczna flory z lat 2011-2016 wykazała udział 11 grup syntaksonomicznych w randze klas. Wśród wyróżnionych grup badanej flory ponad 40% gatunków należała do nitrofilnych zbiorowisk pól uprawnych (klasa *Stellarietea mediae*). Dwie następne grupy gatunków związane były z mezo- i eutroficznymi zbiorowiskami łąkowymi (klasa *Molinio-Arrhenatheretea*) oraz antropogenicznymi siedliskami ruderalnymi (klasa *Artemisietea vulgaris*). Pozostałe grupy syntaksonomiczne reprezentowane były przez znikome liczby gatunków (tab. 5).

Tabela 5 / Table 5

Udział grup syntaksonomicznych w randze klasy / Share of syntaxonomic groups in the class range

Grupa syntaksonomiczna (klasa) Syntaxonomic group (class)	Liczba gatunków Species number	%
<i>Stellarietea mediae</i>	36	41,4
<i>Molinio-Arrhenatheretea</i>	19	21,8
<i>Artemisietea vulgaris</i>	17	19,5
<i>Bidentetea tripartiti</i>	4	4,6
<i>Festuco-Brometea</i>	3	3,4
<i>Koelerio-Corynephoretea</i>	2	2,3
<i>Quercu-Fagetea</i>	2	2,3
<i>Isoëto-Nanojuncetea</i>	1	1,2
<i>Epilobietea angustifolii</i>	1	1,2
<i>Salicetea purpureae</i>	1	1,2
<i>Alnetea glutinosae</i>	1	1,2
Razem / Total	87	100,0

Wśród zidentyfikowanych gatunków w latach 2011-2016 wykazano wyraźną dominację roślin jednorocznych (terofitów), które stanowiły niemal połowę składu gatunkowego badanej flory. W pierwszych latach eksperymentu stosunkowo wysoki udział we florze miały rośliny wieloletnie - hemikryptofity. Natomiast od roku 2013 już wyraźnie dominowały hemikryptofity, z jednoczesną tendencją zmniejszania się udziału terofitów. Przez cały okres obserwacji sukcesywnie zwiększał się udział kłączowych geofitów, sprzyjając przy tym utrwalaniu pokrywy roślinnej (tab. 6).

**Tabela 6 / Table 6**

Spektrum form życiowych roślin według Raunkiaera / *Spectrum of life forms according to Raunkiaer*

Forma życiowa / <i>Form of living</i>	Liczba gatunków / <i>Species number</i>	%
Hemikryptofity / <i>Hemicryptophytes</i> (H)	39	44,8
Terofity / <i>Therophytes</i> (T)	34	39,1
Geofity / <i>Geophytes</i> (G)	11	12,6
Megafanerofity / <i>Megafanerophytes</i> (M)	2	2,3
Chamefity zielne / <i>Green chamephytes</i> (C)	1	1,2
Razem / <i>Total</i>	87	100,0

Przeprowadzone doświadczenie na złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej wykazało, że we wszystkich modelach nawożenia, pod względem pokrycia, duży udział mają wysiane i spontanicznie zasiedlone trawy. Natomiast spośród samosiewnych roślin dwuliściennych ich pokrycie różni się w poszczególnych modelach, np. w modelu NPK dominują rośliny motylkowate, a w modelach z kompostem „Radiowo”, „ZUSOK” i z osadem ściekowym największe pokrycie miały rośliny z rodziny złożonych. W początkowej fazie zasiedlania się roślin duży udział miały rośliny jednoroczne (terofity). Mają one dużą biomasę i są dobrym wskaźnikiem właściwego zapoczątkowania przebiegu rekultywacji biologicznej składowisk. Dość wyraźnie obserwowano to w modelu z kompostem „Complex”. Nie mniej ważną rolę spełniają rośliny motylkowate i złożone. Ich duży udział usprawniał tworzenie pokrywy roślinnej w większości modeli, bowiem wiele gatunków z tych grup to rośliny wieloletnie.

W modelu z NPK bez nawożenia organicznego stosunkowo niższy udział miały hemikryptofity - rośliny darniowe i kępkowe, głównie trawy. Natomiast na złożu z kompostem Radiowo (kRa) duży udział miały rośliny z rodziny komosowatych, krzyżowych i motylkowatych, co świadczy o dużej efektywności rekultywacyjnej złoża z udziałem tego kompostu. Z kolei na złożu z kompostem „Complex” (kC) dominowały rośliny jednoroczne (terofity), głównie rośliny z rodziny komosowatych, co rokuje dla tego modelu nasilenie się procesu glebotwórczego w latach następnych. Efektywność rekultywacji w doświadczalnym modelu z kompostem roślinnym (kr) częściowo usprawniało osiedlanie się wieloletnich roślin dwuliściennych (hemikryptofitów, geofitów i chamefitów zielnych). Jednak stosunkowo niskie pokrycie traw na tym etapie rekultywacji świadczy o jej powolnym tempie. Stwierdzony skład florystyczny w pojemnikach z kompostem „ZUSOK” (kZ) wskazuje, że nawóz ten wpłynął w zaledwie zadawalającym stopniu na przebieg rekultywacji biologicznej. Podczas sześcioletniego okresu doświadczenia w pojemnikach doświadczalnych nawożonych osadem ściekowym (O) wykazano dość dobry rozwój pokrywy roślinnej.

#### IV. WNIOSKI

1. Na podstawie oszacowanego w badanych modelach pokrycia gatunków i plonowania roślin optymalny rozwój pokrywy roślinnej wykazano w pojemnikach z kompostami „Complex”

- i „Radiowo”, a także w modelu z osadem ściekowym. Najniższy rozwój roślinności wykazano w modelach z kompostami „ZUSOK” i „roślinnym” oraz na złożu nawożonym mineralną mieszanką N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O (NPK).
2. Eksperyment na modelowym złożu odpadów paleniskowych wykazał, że istotną rolę w przebiegu rekultywacji składowisk ma sekwencja występowania odpowiednich form życiowych roślin. W początkowym stadium rekultywacji ważną rolę spełniały rośliny jednoroczne (terofity), które pobudzały do kreowania procesu glebotwórczego. W dalszych fazach najwyższą efektywność rekultywacyjną zapewniały trawy oraz rośliny dwuliścienne, zwłaszcza dwuletnie i wieloletnie (hemikryptofity, geofity, chamefity zielne), które utrwalały podłoże.
  3. Podczas prowadzonego eksperymentu zasadniczą rolę w rozwoju pokrywy roślinnej na doświadczalnych złożach pełniły (oprócz traw) rośliny z rodzin: złożonych, komosowatych, motylkowatych, które gromadziły znaczną biomasę, istotną w procesie rekultywacji składowisk.
  4. Duży wpływ na przebieg doświadczenia i sprawność rekultywacji na złożu odpadów paleniskowych miały warunki atmosferyczne (szczególnie wysokie temperatury, susza) i ubożenie związków pokarmowych w podłożu.
  5. Utworzony model doświadczalny (*ex situ*) przebiegu rekultywacji biologicznej odpadów paleniskowych nie może odnosić się do układów rzeczywistych (*in situ* - hałd, składowisk itp.). Jego funkcjonalność jest fragmentaryczna i niekiedy ograniczająca trafne wnioski. Wymaga zatem wielokrotnych powtórzeń i wieloaspektowego testowania.
  6. Składowiska odpadów są konsekwencją ludzkiej konsumpcji. Racjonalne spowalnianie tego zjawiska może przyczynić się do zwiększenia powierzchni biologicznie czynnych i poprawy stanu środowiska naturalnego. Z kolei rekultywacja składowisk odpadów, z udziałem odpowiednio dobranych i spontanicznych roślin, może przyczynić się do zwiększenia bioróżnorodności gatunkowej a nawet krajobrazowej.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Biernacka E. 1976. Wpływ biologicznej rekultywacji składowisk odpadów paleniskowych na niektóre procesy glebowe i skład chemiczny roślin. Zesz. Nauk. SGGW-AR. 86. Warszawa.
2. Braun-Blanquet J. 1964. Pflanzensoziologie, Grundzüge der Vegetationskunde 3. Aufl. Springer. Vienna-New York. 865.
3. Dyguś K. H. 2015. The role of plants in experimental biological reclamation in a bed of furnace waste from coal-based energy. Journal of Ecological Engineering. Vol. 16. 1. 8-22. DOI: 10.12911/22998993/581.
4. Dyguś K. H., Madej M. 2012. Roślinność wielowariantowego doświadczenia modelowego na złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Inżynieria Ekologiczna. 30. 227-240.
5. Dyguś K. H., Siuta J., Wasiak G., Madej M. 2012. Roślinność składowisk odpadów komunalnych i przemysłowych. Wyd. WSEiZ. Warszawa. 134.
6. Dyguś K. H., Wasiak G., Madej M. 2014. Dynamika zmian roślinności w doświadczeniu modelowym ze złożem odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Inżynieria Ekologiczna. 40. 100-121.
7. Gutkowska A., Pawluśkiewicz B. 2006. Kształtowanie zadarnienia i składu florystycznego zbiorowisk trawiastych pod wpływem zabiegów pratotechnicznych na składowisku popiołu EC Siekierki. Annales UMCS. Sec. E. 61. 249-255.
8. Kozłowska B. 1995. Zastosowanie osadów ściekowych do biologicznego zagospodarowania składowisk odpadów paleniskowych. Zesz. Prob. Post. Nauk. Roln. 418. 859-868.

9. Kozłowska B. 1997. Zastosowanie osadów ściekowych do roślinnego zagospodarowania składowisk odpadów paleniskowych (praca doktorska). IPIŚ Zabrze. Łódź. 1997.
10. Maciak F., Liwski S., Biernacka E. 1976. 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. *Rocz. Glebozn.* XXVII. 4. 149-169.
11. Maciak F., Liwski S., Jeżewski Z. 1979. Rekultywacja hałdy popiołowej z węgla brunatnego Elektrowni Konin przez zadrzewienie i zakrzewienie. *Rocz. Glebozn.* 30. 178-198.
12. Madej M. 2007. Zielen miejska źródłem surowca do produkcji kompostu (praca doktorska). WSEiZ. Warszawa. 140.
13. Madej M., Siuta J., Wasiak G. 2010. Zielen Warszawy źródłem surowca do produkcji kompostu. Cz. II. Skład chemiczny masy roślinnej z różnych powierzchni zieleni warszawskiej. *Inżynieria Ekologiczna.* 23. 22-36.
14. Matuszkiewicz W. 2001. Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.
15. Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zajac A. & Zajac M., 2002. Flowering Plants and pteridophytes of Poland a checklist. Krytyczna lista roślin naczyniowych Polski. Wyd. W. Szafer Institute of Botany PAS. Kraków.
16. Opaliński R. 2007. Rekultywacyjna efektywność kompostu Complex na odpadach paleniskowych w doświadczeniu lizymetrycznym (praca magisterska). WSEiZ. Warszawa. 78.
17. Rostański A. 2006. Spontaniczne kształtowanie się pokrywy roślinnej na zwałowiskach po górnictwie węgla kamiennego na Górnym Śląsku. Wydawnictwo UŚ. Katowice.
18. Rutkowski L. 1998. Klucz do oznaczania roślin naczyniowych Polski niżowej. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.
19. Siuta J. 2005. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica.* 2005. 5 (2). 417-425.
20. Siuta J. 2007. System uprawy i kompostowania roślin na składowisku odpadów posodowych w Janikowie z zastosowaniem osadów ściekowych. *Inżynieria Ekologiczna.* 19. 38-58 + 6 fot.
21. Siuta J. i in. 1973. Projekt rekultywacji gruntu oraz urządzenia zieleni w Porcie Północnym i w strefie ochronnej. IUNG. Puławy.
22. Siuta J., Pasińska Cz., Wasiak G. 1988. Przyrodnicze zagospodarowanie odpadów ściekowych. PWN. Warszawa.
23. Siuta J., Chłopecki K., Mamełka D. 1996a. Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych w doświadczeniu lizymetrycznym. *Przyrodnicze użytkowanie osadów ściekowych.* Puławy-Lublin-Jeziórko. 27-34.
24. Siuta J., Wasiak G., Chłopecki K. 1996b. Przyrodniczo-techniczne przetwarzanie osadów ściekowych na kompost. IOŚ, Warszawa.
25. Siuta J., Dyguś K. H. 2013. Plony i chemizm roślin wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. *Inżynieria Ekologiczna.* 35. 7-31.
26. Siuta J., Sienkiewicz J., Dyguś K. H. 2013. Rozwój szaty roślinnej i gleby na składowisku odpadów posodowych w Janikowie w latach 2000-2013. Monografia. Wyd. IOŚ-PIB. Warszawa.
27. Siuta J., Dyguś K. H. 2015. Plony i chemizm roślin wielowariantowego doświadczenia na modelowym złożu odpadów paleniskowych energetyki węglowej. Część II (lata 2012-2013). *Inżynieria Ekologiczna.* 42. 45-60.

28. Siuta J., Wasiak G., Madej M. 2008. Rekultywacja efektywności kompostów i osadów ściekowych na złożu odpadów paleniskowych w doświadczeniu modelowym. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. 34. 145-172 + 26 fot.
29. Westhoff V., van der Maarel E. 1978. The Braun-Blanquet approach. [In:] *Classification of plant communities* (ed. R.H. Whittaker). Junk. The Hague. 287-297.
30. Zarzycki K., Trzcńska-Tacik H., Różański W., Szelaż Z., Wołek J., Korzeniak U. 2002. Ecological indicator values of vascular plants of Poland. *Wyd. W. Szafer Institute of Botany PAS. Kraków*.

### **VEGETATION OF A MULTIVARIANT MODEL EXPERIMENT ON COAL COMBUSTION WASTE DEPOSITS. PART III**

#### **Summary**

*An experimental study of the share of plants in the reclamation of combustion waste deposit from coal engineering was performed in the period of 2011-2016, fertilised with four types of compost and sewage sludge. Combustion waste deposits were contained in cylindrical containers with 80 cm in diameter (0.5 m<sup>2</sup> area) and 100 cm high. Annually, during the vegetation period, the quantity and quality condition was assessed as well as the yield of fertilised plants. Great species diversity of significant biomass was observed. High reclamation effectiveness of combustion waste deposit was observed in the majority of fertilisation options. Biological reclamation of combustion waste sites with the use of soil formation deposits and vegetation is becoming more and more commonly applied and developed. To that end, many experimental studies have been carried out (model, lysimeter, field), one of which being the presented experiment.*

**Key words:** biological reclamation, vegetation, combustion waste of coal engineering, compost, sewage sludge