

Beata JANECKA, Jolanta SOBIK-SZOLTYSEK

Politechnika Częstochowska, Instytut Inżynierii Środowiska  
ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa

## Badania przydatności wybranych technik remediacji terenów zdegradowanych działalnością przemysłu cynkowo-olowiowego

Jednym z ujemnych skutków działalności przemysłu cynkowo-olowiowego jest gromadzenie odpadów pogórnictwa i pohanitcznych. Nagromadzenie tych odpadów powoduje negatywne przekształcanie środowiska przyrodniczego na skutek pylenia i migracji metali do gleb oraz wód powierzchniowych i gruntowych. Z uwagi na ich niekorzystne właściwości rekultywacja takich składowisk jest utrudniona, zwłaszcza rekultywacja biologiczna. Celem badań był dobór najkorzystniejszych dodatków do odpadu popłuczkowego z przerobu rud Zn-Pb dla uzyskania optymalnych warunków wegetacji roślin. Jako dodatki organiczne, wzbogacające materiał odpadowy na składowisku w składniki odżywcze, zaproponowano torf ogrodniczy oraz „materiały odpadowe” w postaci kompostu z odpadów komunalnych, osadu ściekowego i zużytego podłoża do uprawy pieczarek. Przydatność zaproponowanych dodatków oceniano za pomocą testu *Lepidium*. Najkorzystniejszym dodatkiem okazał się kompost dodany do odpadu w ilości 5% wag. Dodatek osadu ściekowego powodował ograniczenie przyrostu korzeni rzeżuchy. Wyniki testu wykazały, że w odpadzie popłuczkowym nie występują czynniki fitotoksyczne, na które nasiona rzeżuchy są szczególnie wrażliwe.

Podjęto również próbę modyfikacji składu granulometrycznego odpadu w celu poprawy właściwości fizykochemicznych podłoża. Jak wykazały badania, każda modyfikacja składu granulometrycznego odpadu poprawiła jego właściwości jako podłoża dla wegetacji roślin, a przyrost świeżej biomasy na mieszaninach odpadu z substancją mineralną był większy od przyrostu uzyskanego na samym odpadzie.

**Słowa kluczowe:** odpady popłuczkowe Zn-Pb, składowanie, remediacja, odpady organiczne i mineralne, test *Lepidium*, fitotoksyczność, modyfikacja składu

### Wprowadzenie

Obszar Górnego Śląska należy do najbardziej zdegradowanych regionów Polski, głównie na skutek działalności podziemnego górnictwa węglowego i rudnego oraz odkrywkowej eksploatacji piasków i żwirów. Efektem eksploatacji górniczej są formy antropogeniczne w postaci czynnych i nieczynnych zwałowisk, osadników popłuczkowych i poflotacyjnych, wyrobisk poeksploatacyjnych i terenów poprzemysłowych. Przywrócenie tych obszarów do użytkowania jest w wielu przypadkach bardzo utrudnione z uwagi na charakter występujących na nich odpadów. Rekultywacja i zagospodarowanie takich obiektów, pomimo wysokich nakładów finansowych, często nie przynosi oczekiwanych rezultatów [1].

Jedną z grup odpadów stanowiących poważny problem dla województwa śląskiego i małopolskiego są nagromadzone na powierzchni kilkuset hektarów odpady



popłuczkowe, poflotacyjne i hutnicze z przemysłu cynkowo-ołowiowego. Należą one do odpadów uciążliwych dla środowiska, między innymi z uwagi na możliwość uwalniania jonów metali ciężkich w nich zawartych i w efekcie przedostawania się ich do łańcucha troficznego. Drobnociarność odpadów poflotacyjnych i popłuczkowych, niedobór w nich substancji niezbędnych dla prawidłowego wzrostu roślin [2, 3] oraz fitotoksyczność są głównymi przyczynami trudności w rekultywacji biologicznej terenów, na których zostały zdeponowane. Trudności w uzyskaniu skutecznej stabilizacji powierzchni składowisk odpadów przemysłu Zn-Pb za pomocą szaty roślinnej powodują intensyfikację procesów erozyjnych. Skutkiem tego jest pylenie i wywiewanie drobnych cząstek zawierających metale ciężkie, szczególnie uciążliwych w przypadku lokalizacji składowisk w obszarach miejskich. Dodatkowy problem stanowi duża ilość odpadów powstałych w wyniku pozyskiwania metali z rudy, zgromadzona na składowiskach. Przykładowo dla uzyskania 1 Mg metalicznego cynku konieczne jest wydobycie i przetworzenie 36 Mg surowej rudy [4].



Rys. 1. Składowisko odpadów popłuczkowych w Piekarach Śląskich

Biorąc pod uwagę ilość nagromadzonych odpadów i ich toksyczność, bardzo istotnym problemem jest zapobieganie erozji powierzchni osadników poprzez stabilizację metodami mechanicznymi, chemicznymi i biologicznymi. Do tej pory bowiem nie opracowano wystarczająco skutecznych technologii gospodarczego wykorzystania tych odpadów w skali mającej znaczenie dla zmniejszenia ilości i zajmowanego przez nie terenu [5], a badania możliwości odzysku z nich pozostałej ilości metali wykazały, że nowo powstały odpad nadal stanowi zagrożenie dla środowiska [6]. Podstawowym zadaniem rekultywacji jest w tym przypadku stwo-



rzenie takiej jakości obiektu, która umożliwi przede wszystkim wyeliminowanie jego uciążliwości dla środowiska. Jak wykazały badania prowadzone przez A. Patrzalka i Z. Strzyszcza [7, 8], skuteczna rekultywacja biologiczna tych odpadów wymaga odpowiednich zabiegów uprawowych, zastosowania nawożenia oraz starannego doboru roślinności. Podejmowane dotychczas próby rekultywacji biologicznej, szczególnie odpadów popłuczkowych, nie dały zadowalających efektów. Nie uzyskano bowiem trwałej i pełnej pokrywy roślinnej. Zdecydowana większość roślin wyginęła w krótkim czasie, a wzrost i rozwój pozostałych był wyraźnie ograniczony przez właściwości podłoża. Stan sukcesji biologicznej na powierzchni składowiska odpadów popłuczkowych przedstawia rysunek 1.

Celem podjętych badań była próba znalezienia skutecznej metody remediacji składowisk odpadów popłuczkowych przemysłu Zn-Pb poprzez zastosowanie domieszek materiałów zawierających niezbędne dla wzrostu roślin składniki oraz modyfikujących skład ziarnowy badanego odpadu. Obserwowano wpływ dodatków na możliwość uzyskania trwałej pokrywy roślinnej, zapobiegającej degradacji terenów składowisk.

## 1. Materiał i metodyka badań

Badania prowadzono na materiale pobranym ze składowiska odpadów popłuczkowych z przerobu rud cynkowo-ołowiowych. Odpady te powstały w procesach wzbogacania grawitacyjnego rudy w osadzarkach. Obiekt zlokalizowany jest w Piekarach Śląskich. Głównym składnikiem odpadu jest drobnoziarnisty dolomit zawierający około 7,0% Zn, 1,53% Pb i 0,36% Cd. W próbkach pobranych na składowisku z miejsc pozbawionych okrywy roślinnej stwierdzono zawartość podstawowych składników pokarmowych dla roślin nieprzekraczającą:

- ✓  $N_{Kjedahla}$  - 0,1%
- ✓ P w  $mgP_2O_5/100\text{ g}$  - 1,24
- ✓  $C_{org}$  - 0,05%
- ✓ K w  $mgK_2O/100\text{ g}$  - 12,1
- ✓ metale biodostępne, mg/kg: Pb - 20,1, Cd - 2,11, Zn - 85,21

Realizacja założonego celu wymagała prowadzenia badań w dwóch kierunkach:

- zastosowania wytypowanych domieszek organicznych dla wzbogacenia podłoża w substancje odżywcze,
- zastosowania domieszek substancji mineralnych dla poprawy struktury podłoża.

### 1.1. Badania domieszek organicznych

W badaniach użyto takich dodatków organicznych, jak:

- torf ogrodniczy (T);
- kompost z odpadów komunalnych pochodzący z Kompostowni MPGK Katowice (K);



- ustabilizowany osad ściekowy z Oczyszczalni „Siemianowice”, pobrany z poletek osadowych (O);
- zużyte podłoże stosowane wcześniej do uprawy pieczarek (P).

O wyborze zastosowanych dodatków zadecydowała:

- możliwość zagospodarowania istniejących odpadów, bogatych w substancję organiczną;
- łatwość ich pozyskania;
- dogodna lokalizacja miejsc ich powstawania.

Zastosowanie torfu ogrodniczego wynikało z jego wzorcowych właściwości zapewniających optymalny wzrost i rozwój roślinności.

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analiz zastosowanego kompostu wraz z porównaniem do wymagań, jakie stawiane są w rozporządzeniu [9] do ustawy o nawozach i nawożeniu [10]

Tabela 1

#### Charakterystyka kompostu z Kompostowni MPGK Katowice

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Średnia zawartość	Wymagania wg Rozporządzenia [9]
Substancje organiczne	% s.m.	32,3	min. 20
Węgiel organiczny	% s.m.	9,0	-
Azot ogólny Kjeldahla	% s.m.	1,0	nie mniej niż 1
Fosfor ogólny	% s.m.	0,6	nie mniej niż 0,5
Potas	% s.m.	0,2	nie mniej niż 1
pH	-	7,3	-
Zawartość wody	%	40	-
Kadm	mg/kg	6,6	5
Chrom	mg/kg	85	100
Miedź	mg/kg	328	-
Nikiel	mg/kg	49	60
Ołów	mg/kg	292	140
Cynk	mg/kg	1740	-
Rtęć	mg/kg	0,10	2
Bakterie grupy coli	cm <sup>3</sup>	0,15	-
Bakterie grupy coli typu kałowego	cm <sup>3</sup>	>1,9	-
<i>Clostridium perfringens</i>	cm <sup>3</sup>	0,09	-
Jaja helmintów	szt.	nie występują	-
<i>Salmonella</i>	występowanie	nie określano	brak
<i>Ascaris sp.</i> , <i>Trichuri sp.</i> , <i>Toxocara sp.</i>	występowanie	nie określano	brak

Porównanie składu kompostu z wymaganiami z rozporządzenia [9] wykazuje przekroczenie dopuszczalnej zawartości jedynie w przypadku ołowiu. Niedobór potasu można uzupełnić, stosując odpowiednie nawożenie.

Tabela 2 przedstawia wyniki analiz osadu ściekowego z Oczyszczalni „Siemianowice” w porównaniu do wymagań Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie komunalnych osadów ściekowych [11].



Tabela 2

## Charakterystyka komunalnego osadu ściekowego z Oczyszczalni „Siemianowice”

Rodzaj oznaczenia	Jednostka	Średnia zawartość w analizowanych osadach ściekowych	Wymagania wg Rozporządzenia [11] przy zastosowaniu		
			w rolnictwie oraz do rekultywacji gruntów na cele rolne	do rekultywacji terenów na cele nierolne	przy dostosowaniu gruntów do określonych potrzeb wynikających z planów gospodarki odpadami, planów zagospodarowania przestrzennego lub decyzji o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, do uprawy roślin przeznaczonych do produkcji kompostu, do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i produkcji pasz
Cynk	mg/kg s.m.	2230	2500	3500	5000
Ołów	mg/kg s.m.	238	500	1000	1500
Kadm	mg/kg s.m.	8,45	10	25	50
Chrom	mg/kg s.m.	42,5	500	1000	2500
Miedź	mg/kg s.m.	170,5	800	1200	2000
Nikiel	mg/kg s.m.	25,0	100	200	500
Rtęć	mg/kg s.m.	1,5	5	10	25
pH	-	8,1	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Sucha masa	%	29,8	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Substancja organiczna (straty przy prażeniu w 600°C)	% s.m.	46,2	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Azot ogólny	% s.m.	3,55	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Azot amonowy	% s.m.	0,83	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Fosfor ogólny	% s.m.	5,6	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Wapń	% s.m.	6,09	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
Magnez	% s.m.	1,06	Nie określa się	Nie określa się	Nie określa się
<i>Salmonella</i>	-	nie wyizolowano	nie wyizolowano w 100 g osadu	Nie określa się	Nie określa się
<i>Ascaris sp.</i> <i>Trichuri sp.</i> <i>Toxocara sp.</i>	szt./kg s.m.	brak	0	do 300	do 300

Analizowany osad ściekowy spełnia wymagania rozporządzenia do zastosowania go do rekultywacji na cele rolne.

Nie przeprowadzono szczegółowych analiz pozostałych dodatków organicznych, tj. torfu ogrodniczego oraz podłoża z uprawy pieczarek, zakładając, że materiały te, wykorzystywane do celów rolnych, spełniają wymagania dla takiego zastosowania.



Dla określenia optymalnej domieszki dodatków organicznych prowadzono badania ich mieszanek z odpadem (D), które sporządzono w proporcjach przedstawionych w tabeli 3.

Tabela 3

## Skład badanych mieszanek

Mieszanka	Udział, % wag.				
	Odpad (D)	Torf (T)	Kompost (K)	Osad ściekowy (O)	Podłoże z pieczarek (P)
D	100	-	-	-	-
T1	98,5	1,5	-	-	-
T2	97,5	2,5	-	-	-
T3	95	5	-	-	-
T4	90	10	-	-	-
K1	98,5	-	1,5	-	-
K2	97,5	-	2,5	-	-
K3	95	-	5	-	-
K4	90	-	10	-	-
O1	98,5	-	-	1,5	-
O2	97,5	-	-	2,5	-
O3	95	-	-	5	-
O4	90	-	-	10	-
P1	98,5	-	-	-	1,5
P2	97,5	-	-	-	2,5
P3	95	-	-	-	5
P4	90	-	-	-	10

### 1.2. Metodyka wykonania testu *Lepidium*

Dotychczasowe trudności w stabilizacji biologicznej powierzchni badanego osadnika popłuczkowego, potwierdzone obserwacjami terenowymi, sugerują możliwość występowania w odpadach substancji o działaniu fitotoksycznym lub występowania efektu synergistycznego (wzajemne wzmocnienie działania dwóch lub kilku substancji występujących razem w środowisku). Ocena toksyczności badanego odpadu oraz stosowanych domieszek przeprowadzono w oparciu o test biologiczny *Lepidium*. Wrażliwość korzeni *Lepidium sativum* (rzeżucha ogrodowa) na obecność związków mutagennych oraz kancerogennych w podłożu pozwala na wykorzystanie tego gatunku w pracach laboratoryjnych jako testu biologicznego. W badaniach prowadzonych przez Waltera i innych [12] nasiona rzeżuchy były wykorzystywane do oceny toksyczności osadów ściekowych przeznaczonych do rolniczego zagospodarowania. Podobnie Maila i Cloete [13] w swoich doświadczeniach stosowali nasiona *Lepidium sativum* do określenia wpływu zanieczyszczenia WWA (PAHs) na glebę. Test *Lepidium* jest testem korzeniowym. Pod wpływem związków cytotoksycznych zachodzi inhibicja procesów podziału komórek merystematycznych korzeni, co prowadzi do zahamowania ich rozwoju [14, 15].



Test wykonano w oparciu o metodykę określoną Rozporządzeniem Ministra Środowiska w sprawie warunków, w których uznaje się, że odpady nie są niebezpieczne [16], oraz na podstawie doniesień literaturowych [13]. Przeprowadzono go na odpadzie, mieszkankach odpadu z dodatkami oraz jako kontrolę na podłożu z bibuły. Do badań stosowano skiełkowane nasiona rzeżuchy ogrodowej otrzymane przez wysianie ich na podłoże z bibuły zwilżonej wodą destylowaną, które następnie umieszczono na płytce Petriego. Płytki przetrzymywano w temperaturze pokojowej przy dobrym dostępie światła i po upływie 17-22 godzin wybrano do badań testowych skiełkowane nasiona, których korzenie osiągnęły długość ok. 1 mm. Każdorazowo wykonanie testu polegało na umieszczeniu na płytce Petriego 20 g badanego materiału, który przykrywano bibułą, zwilżano i układano na niej po 30 nasion skiełkowanej rzeżuchy. Kontrolę prowadzono, wysiewając przygotowane nasiona na samą bibułę zwilżoną wodą destylowaną. Następnie płytki umieszczano w cieplarni w temperaturze 25°C i inkubowano przez 24 godziny. Po inkubacji korzenie barwiono czerwienią rutenową i pod binokulem mierzono ich długość. Każdy test wykonano w 5 powtórzeniach.

Toksyczność określono jako % inhibicji wg wzoru [16]:

$$\% I = \frac{100(L_K - L_T)}{L_K} \quad (1)$$

gdzie:  $L_K$  - średnia długość korzenia dla próby kontrolnej, mm,

$L_T$  - średnia długość korzenia dla próby testowej, mm.

W przypadkach gdy długość korzeni była równa lub większa w stosunku do próby testowej, inhibicję przyjmowano jako 0, zakładając, że obliczona wg wzoru (1) odzwierciedla skrócenie długości korzeni w stosunku do próby kontrolnej.

### 1.3. Badania domieszek mineralnych

Optymalne warunki dla wzrostu i rozwoju roślin wymagających siedlisk żywnych tworzą gleby o składzie granulometrycznym pyłu ilastego, gliny lekkiej i średniej pylastej [17]. Gliny ciężkie oraz ropy nie są w stanie stworzyć optymalnych warunków do intensywnej wegetacji roślin ze względu na utrudnione napowietrzanie, silne zaskorupianie się, nadmierną grząskość, bardzo dużą siłę wiązania wody i utrudnione pobieranie jej przez rośliny. Procentowy skład granulometryczny ww. gleb przedstawia się następująco [17]:

- pył ilasty: piasek (0÷25%), pył (60÷85%), ropy (15÷35%)
- glina lekka: piasek (55÷65%), pył (15÷37%), ropy (8÷20%)
- glina średnia: piasek (40÷80%), pył (0÷25%), ropy (20÷35%)

W celu określenia, czy badany odpad posiada odpowiedni dla wzrostu i rozwoju roślin skład granulometryczny, oznaczono w nim zawartość frakcji piasku, pyłu i ropy oraz odniesiono uzyskane wyniki do analiz składu granulometrycznego trzech próbek gleb:



**Gleba A** - pobrana z Bytomia z terenu Rolniczej Spółdzielni Produkcyjnej „Przyszłość”,

**Gleba B** - pobrana z terenu pola uprawnego w Żarnowcu,

**Gleba C** - pobrana z terenu pola uprawnego w Tychach.

Analizę wykonano metodą areometryczną w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego [18].

Porównanie analiz było podstawą określenia uzupełnienia w celu uzyskania założonego składu granulometrycznego. Jako domieszki zastosowano:

- piasek z kopalni piasku „Szczakowa”
- ił pobrany z odkrywki w Miasteczku Śląskim, eksploatowanej przez firmę F.C.B. „Ronenberger-Ltd.”

Proporcje mieszanek przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4

#### Mieszanki odpadu z dodatkami mineralnymi

Oznaczenie próby	Zawartość składników mieszanki, % wag.		
	Piasek	Odpad	Ił
I	40	50	10
II	30	60	10
III	20	70	10
IV	30	50	20
V	20	60	20
VI	10	70	20

Doświadczenie polegało na przygotowaniu podłoży, według proporcji przedstawionych w tabeli 4, a następnie napełnieniu nimi doniczek o pojemności 0,33 l. Próbkę kontrolną stanowił odpad bez dodatków oraz gleba C. Na przygotowane podłoża wysiano rzeżuchę ogrodową. Doświadczenie prowadzono w komorze fitotronowej przez okres trzech tygodni przy parametrach komory:

- temperatura: dzień 25÷27°C, noc 20÷22°C
- wilgotność powietrza: dzień 55÷60%, noc 70÷80%
- fotoperiod: dzień 16 h, noc 8 h

Do oceny skuteczności zastosowanych dodatków posłużył przyrost świeżej biomasy rzeżuchy (metoda wagowa) oraz pomiar długości jej korzeni. Doświadczenie wazonowe wykonano w 3 powtórzeniach.

## 2. Wyniki badań i ich omówienie

Podstawą określenia toksyczności badanych podłoży były wyniki testu *Lepidium*. W tabeli 5 przedstawiono średnie długości korzeni rzeżuchy uzyskane z doświadczenia.





Tabela 5

## Średnie długości korzeni rzeżuchy

Rodzaj podłoża	Długość korzeni rzeżuchy mm	Inhibicja I %
Podłoże kontrolne (bibuła)	21,1	0
D	21,4	0*
T1	15,7	25,6
T2	15,5	26,5
T3	18,9	10,4
T4	19,0	10,0
K1	21,7	0*
K2	22,3	0*
K3	22,7	0*
K4	11,9	43,6
O1	12,6	40,3
O2	11,9	43,6
O3	7,4	65,0
O4	5,1	75,8
P1	15,1	28,4
P2	13,1	37,9
P3	14,7	30,3
P4	10,9	48,3

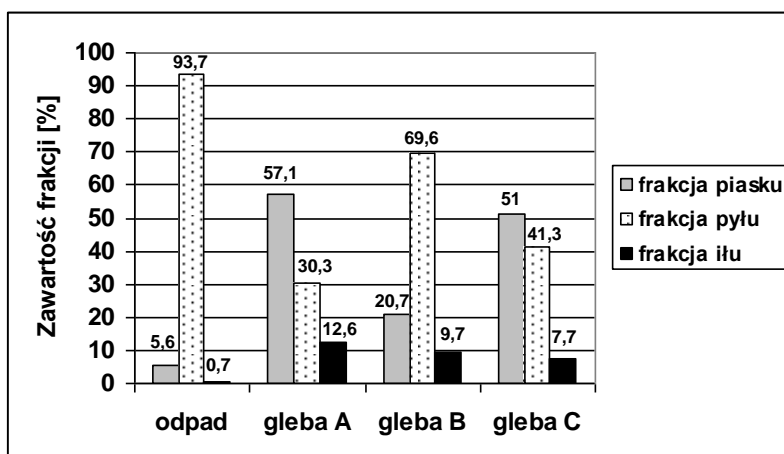
\* nie obliczano inhibicji w przypadku zaobserwowania zjawiska stymulacji (wydłużenie korzeni rośliny testowej w stosunku do próby kontrolnej)

Najdłuższe korzenie rzeżuchy uzyskano na podłożu zawierającym 5% dodatek kompostu (K3). Niewiele mniejszy przyrost zanotowano na podłożu K2 (2,5% wag. kompost). Najkrótsze korzenie otrzymano na podłożu z domieszką osadu ściekowego. Osad ściekowy, wraz ze wzrostem dawki, hamował przyrost korzeni. Obliczony dla mieszanek odpadu z osadem ściekowym procent inhibicji jest najwyższy, co sugeruje obecność w ich składzie substancji (składników) ograniczających wzrost korzeni rzeżuchy. Dodatek torfu oraz podłoża z hodowli pieczarek nie wpłynął korzystnie na przyrost korzeni. Uzyskano długości znacznie mniejsze aniżeli u roślin uprawianych na podłożu kontrolnym i podłożu z odpadu. W wariantach doświadczenia z zastosowaniem 1,5%, 2,5% i 5% dodatku substancji organicznej największe przyrosty korzeni uzyskano, stosując domieszkę kompostu. W tych trzech wariantach długości korzeni były większe od uzyskanych na podłożu kontrolnym. Wśród mieszanek z 10% udziałem dodatku jedynie w przypadku torfu przyrost korzeni był największy. Analiza wyników testu *Lepidium* sugeruje, że większość zaproponowanych dodatków organicznych zawiera składniki ograniczające przyrost korzeni roślinności testowej. Wyjątek stanowi odpowiednia domieszka kompostu, nieprzekraczająca 5% wag. W warunkach przeprowadzonych doświadczeń odpad nie wykazywał właściwości mitodepresyjnych, a zmierzone



długości korzeni były porównywalne z uzyskanymi na podłożu kontrolnym. Można więc stwierdzić, że odpad nie wykazuje fitotoksyczności, a odpowiednio dobrany ilościowo i jakościowo dodatek organiczny poprawia jego właściwości jako podłoża „glebowego”.

Przyczyną trudności w uzyskaniu trwałej okrywy roślinnej na składowisku badanych odpadów, oprócz braku odpowiedniej ilości substancji odżywczych, może być nieodpowiednia jego struktura. Ponieważ najbardziej oczekiwanymi frakcjami w glebie optymalnej dla roślin są frakcje piaszkowa, pyłowa i ilowa w odpowiednich proporcjach, porównano ich zawartość w odpadzie oraz trzech próbkach gleb uprawnych. Uzyskane wyniki analiz przedstawia rysunek 2.



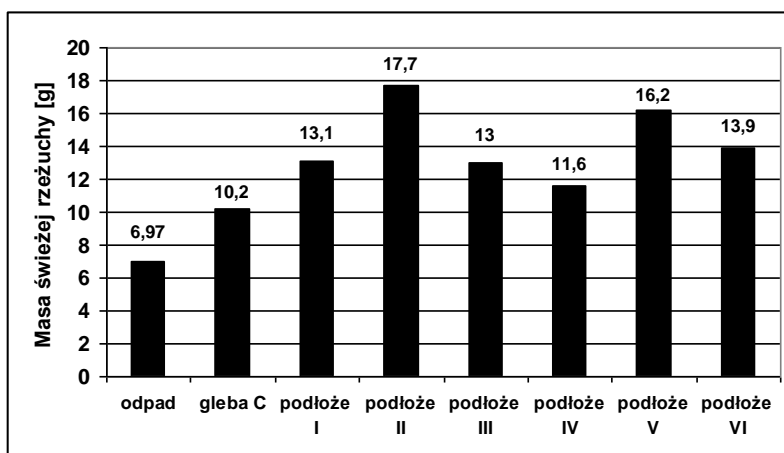
Rys. 2. Zawartość frakcji piasku, pyłu i łu w odpadzie oraz pobranych glebach

W odpadzie dominującą frakcją jest frakcja pyłowa, której nadmiar powoduje podatność odpadu na erozję wodną, a przy dużym jego zagęszczeniu (jak ma to miejsce na składowisku) utrudnienia dla przenikania korzeni roślin. Mała zawartość frakcji piasku wpływa na przepuszczalność i przewodność gleby, a obserwowany niski udział frakcji ilowej zmniejsza pojemność sorpcyjną w stosunku do kationów [19]. Sugeruje to konieczność modyfikacji składu granulometrycznego poprzez zastosowanie odpowiednich domieszek mineralnych.

Na rysunku 3 przedstawiono wielkość przyrostu świeżej biomasy rzeżuchy, uzyskaną na odpadzie, glebie C oraz mieszankach odpadu i dodatków mineralnych, sporządzonych wg proporcji ujętych w tabeli 4.

Największy przyrost świeżej biomasy uzyskano dla podłoża II, nieco mniejszy zanotowano na podłożu V. W obu tych mieszankach udział wagi odpadu wynosił 60%, lecz w podłożu II większy był o 10% udział frakcji piaszkowej (30% wag.). Porównywalne, lecz zdecydowanie mniejsze przyrosty uzyskano na podłożach I i VI, różniących się znacznie proporcją zastosowanych domieszek. Najmniejszy przyrost odnotowano na jednorodnym podłożu odpadów, co staje w sprzeczności wobec uzyskanych dużych wzrostów korzeni rzeżuchy.

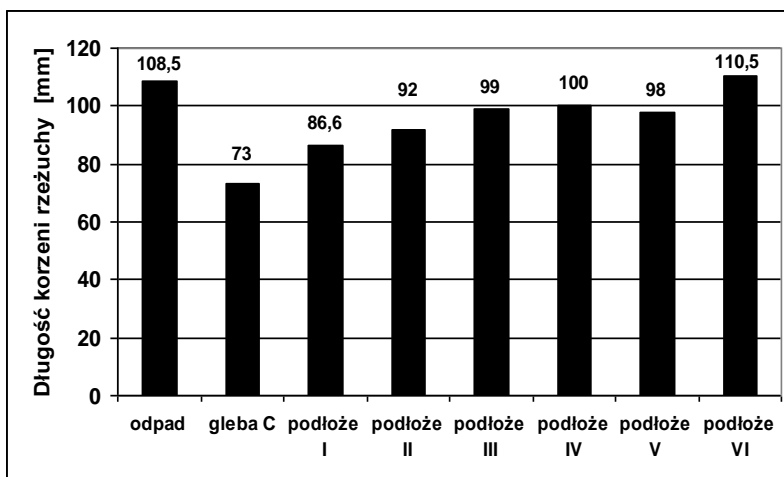




Rys. 3. Przyrost świeżej biomasy

Przyczyną uzyskania tak niejednoznacznych wyników mógł być niefortunny czas, w którym prowadzono test. Nasiona rzeżuchy wykazują słabe zdolności kiełkowania w miesiącach zimowych. Prowadzone doświadczenia należałoby zatem powtórzyć oraz zastosować w doświadczeniach wazonowych inne rośliny testowe. Przyrost biomasy dla wszystkich zastosowanych mieszanek był większy od przyrostu na glebie uprawnej z rejonu Tychów (gleba C), która różni się składem granulometrycznym od sporządzonych mieszanek (duży udział frakcji piasku, niewielki frakcji łu).

Drugim parametrem pozwalającym ocenić skuteczność modyfikacji składu ziarnowego podłoża glebowego była długość korzeni rzeżuchy. Porównanie długości korzeni uzyskanych na odpadzie, glebie C i zmodyfikowanych podłożach przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Długości korzeni rzeżuchy uzyskane na różnych podłożach



Analiza uzyskanych wyników wykazała, że modyfikacja składu granulometrycznego podłoża nie wpływa w sposób znaczący na długość systemu korzeniowego rośliny testowej. Istotną różnicę zauważa się jedynie w przypadku gleby C oraz podłoża I, w których udział frakcji piasku był największy. Największą długość korzeni odnotowano na podłożu VI, w którym udział wagowy odpadu był największy ze wszystkich mieszanek i wynosił 70%. Potwierdza to wcześniejsze wyniki uzyskane w teście *Lepidium*.

### Podsumowanie i wnioski

Odpady przemysłu cynkowo-ołowiowego stanowią dużą uciążliwość dla środowiska z uwagi na ich ilość zgromadzoną na zwałowiskach, drobnoziarnistość i związane z nią pylenie oraz możliwość uwalniania jonów metali ciężkich. Bardzo istotna jest zatem stabilizacja powierzchni składowisk tych odpadów, w tym stabilizacja biologiczna. Dotychczas prowadzone próby rekultywacji biologicznej, szczególnie odpadów popłuczkowych, nie przynosiły zadowalających rezultatów. Wstępne badania prowadzone w celu znalezienia skutecznej metody remediacji składowisk takich odpadów poprzez stosowanie dodatków organicznych i/lub mineralnych do odpadu pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyniki testu *Lepidium* wykazały, że w odpadzie popłuczkowym nie występują czynniki fitotoksyczne, na które nasiona rzeżuchy są wrażliwe.
2. Najkorzystniejszym ze stosowanych dodatków organicznych wydaje się być kompost, szczególnie gdy jego udział w mieszaninie zawiera się w przedziale 2,5÷5%. Dla takich mieszanin uzyskano największe przyrosty korzeni rzeżuchy.
3. Komunalny osad ściekowy hamował przyrost korzeni wraz ze wzrostem dawki w mieszance. Dla mieszanin odpadu z osadem procent inhibicji był najwyższy.
4. Oprócz braku odpowiedniej ilości substancji odżywczych przyczyną trudności w uzyskaniu trwałej i pełnej pokrywy roślinnej na składowiskach odpadów popłuczkowych jest nieodpowiednia ich struktura. Jak wykazały badania, każda modyfikacja składu granulometrycznego odpadu zdecydowanie poprawiła jego właściwości jako podłoża „glebowego”. Przyrost świeżej biomasy rzeżuchy w przypadku każdej analizowanej mieszaniny odpadu z substancją mineralną był większy od przyrostu uzyskanego na samym odpadzie, przykładowo dla podłoża II blisko 2,5-krotnie.

Badania potwierdziły możliwość poprawy właściwości odpadów popłuczkowych przemysłu Zn-Pb jako podłoża „glebowego”. Na tym etapie badań nie prowadzono identyfikacji czynników obecnych w glebie, które mogą zakłócać wzrost i rozwój roślinności. Celowe zatem jest prowadzenie dalszych doświadczeń pozwalających je określić. Należy również podjąć próbę wyboru lokalnych ekotypów roślin, które w tych specyficznych warunkach siedliskowych zapewnią utworzenie trwałej i pełnej pokrywy. Niektóre zaproponowane w badaniach substancje modyfikujące właściwości odpadu popłuczkowego są odpadami, stąd ich perspektywiczne wykorzystanie w pracach rekultywacyjnych będzie miało aspekt zarówno ekonomiczny, jak i proekologiczny.



*Sprzęt, który posłużył do badań, zakupiono w ramach projektu: Wyposażenie Centralnego Laboratorium Środowiskowego nr WKP\_1/1.4.3/2/2005/61/180/365/2006/U, Sektorowy Program Operacyjny Wzrost konkurencyjności przedsiębiorstw, lata 2004-2006, Priorytet 1 Rozwój przedsiębiorczości i wzrost innowacyjności poprzez wzmocnienie instytucji otoczenia biznesu. Działanie 1.4. Wzmocnienie współpracy między sferą badawczo-rozwojową a gospodarką. Badania zostały sfinansowane w ramach badań statutowych BS 401/302/08.*

## Literatura

- [1] Bąba W., Błońska A., Kompała A., Wpływ przemysłu na kształtowanie się spontanicznej roślinności nieużytków przemysłowych, Materiały IV Konferencji Naukowej Śląskie seminarium ochrony środowiska nt. Restrukturyzacja przemysłu a problemy ochrony środowiska i transportu, Wyd. Wyższa Szkoła Ekonomii i Administracji, Bytom 2003, 25-26.
- [2] Krzaklewski W., Pietrzykowski M., Problemy oraz możliwości biologicznej stabilizacji osadników odpadów po flotacji rud cynku i ołowiu, Miesięcznik WUG, 2001, 3, 10-17.
- [3] Sobik-Szołtysek J., Zieleń na ... metalu, Ekoprofit 2002, 4, 144-151.
- [4] Metodyka optymalizacji wykorzystania surowców mineralnych w procesach przeróbki i przetwórstwa, Praca zbiorowa, Synteza celu 12A CPBR 1.7., Studia i rozprawy - raport 14, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków 1991.
- [5] Girczys J., Sobik-Szołtysek J., Odpady przemysłu cynkowo-ołowiowego, seria Monografie nr 87, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2002.
- [6] Rosik-Dulewska C., Karwaczyńska U., Cichy K., Wróbel R., Ocena zagrożenia środowiska naturalnego odpadami poflotacyjnymi rud cynku i ołowiu ze składowiska w Piekarach Śląskich oraz odpadami powtórnej flotacji, Archiwum Ochrony Środowiska 1998, 24, 2, 119-130.
- [7] Patrzalek A., Strzyszczyński Z., Badania terenowe nad możliwością biologicznej odbudowy osadników poflotacyjnych, Archiwum Ochrony Środowiska 1981, 3-4, 165-174.
- [8] Strzyszczyński Z., Właściwości fizyczne, fizykochemiczne i chemiczne odpadów poflotacyjnych rud cynku i ołowiu w aspekcie ich biologicznej rekultywacji, Archiwum Ochrony Środowiska 1980, 3-4, 19-50.
- [9] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, DzU 2008 Nr 119, poz. 765.
- [10] Ustawa o nawozach i nawożeniu (tekst jednolity) z 10 lipca 2007 r., DzU 2007 Nr 147, poz. 1033.
- [11] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 1 sierpnia 2002 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych, DzU 2002 Nr 134, poz. 1140.
- [12] Walter I., Martínez, Cala V., Heavy metal speciation and phytotoxic effect of three sewage sludges for agricultural uses, Environmental Pollution 2006, 139, 507-514.
- [13] Maila M.P., Cloete T.E., Germination of *Lepidium sativum* as a method to evaluate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal from contaminated soil, International Biodeterioration and Biodegradation 2002, 50, 107-113.
- [14] Broda B., Grabias B., Ocena biologicznej aktywności cytotoksycznej niektórych związków chemicznych występujących w środowisku człowieka za pomocą testów roślinnych I. Test *Lepidium*, Farmacja Polska 1979, XXXV 12, 707-709.
- [15] Gong P., Wilke B.-M., Strozzi E., Fleischmann S., Evaluation and refinement of a continuous seeds germination and early seedling growth test the use in the ecotoxicological assessment of soil, Chemosphere 2001, 44, 491-500.
- [16] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 maja 2004 r. w sprawie warunków, w których uznaje się, że odpady nie są niebezpieczne, DzU 2004 Nr 128, poz. 1347.
- [17] Siuta J., Natura i technologia środowiska glebowego, Człowiek i Środowisko 1983, 7, 377-398.



- [18] Bednarek R., Dziadowiec H., Pokojka U., Prusinkiewicz Z., *Badania ekologiczno-gleboznawcze*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 2004.
- [19] Zawadzki S. (red.), *Gleboznawstwo*, Państwowe Wyd. Rolnicze i Leśne, Warszawa 1999.

### Feasibility Studies on the Application of the Selected Remediation Techniques for Areas Degraded by Zn-Pb Industry

One of the major disadvantages of Zn-Pb industry is generation and accumulation of post-mining and post-metallurgic waste. The waste accumulated on a significant surface area causes deterioration of natural environment by various emissions and migration of heavy metals to soil as well as to surface and ground water, and thus introduces the toxic substances into the food chain. Washery waste is considered to pose a serious problem. The properties of washery waste, i.e. fine-grain particle size, deficiency of substances essential for proper growth of plants and also a high content of heavy metals, impede the process of biological reclamation applied to the areas where the washery waste were deposited. The aim of the presented investigation was to search for the efficient method, suitable for reclamation of washery waste landfills. This was done by applying selected materials containing the substances essential for plant growth and by modifying the granular content of investigated waste. The substrate for investigations was sampled from the washery waste (generated during gravitational Zn-Pb ore concentration) deposited at the landfill in Piekary Śląskie (South Poland). The fine-grained dolomite was the main constituent of the investigated waste. It contained about 7.0% Zn, 1.53% Pb and 0.36% Cd. Agricultural peat and compost produced from municipal waste, sewage sludge and spent mushroom substrate were used as the organic components for increasing the content of nutritional constituents in the investigated waste. Peat and compost were selected according to possible methods of waste management, availability of organic waste and localization of waste generating operations. The toxicity of the investigated waste and materials was assessed by the *Lepidium* biological test. The mixture of waste and 5% of compost (by weight) was considered to be the most beneficial option. The addition of sewage sludge to the mixture caused the inhibition of the growth of watercress roots. The highest value of inhibition rate was calculated for the mixture of waste and sewage sludge. The addition of agricultural peat and compost produced from municipal waste, sewage sludge and spent mushroom substrate did not improve the growth of watercress roots either. With the reference to the *Lepidium* test results, no phytotoxic components in the washery waste were present and the qualitative and quantitative addition of organic material to the mixture improved its properties as a soil base.

The limited growth of plants on the soil base prepared from the investigated waste, apart from the lack of sufficient content of nutritional substances, could be due to poor structure of the soil base. Therefore, the modification of granular content of the investigated waste was performed in order to improve the waste physical and mechanical properties. The investigated waste was modified with the addition of sand and clay in a selected ratio. The increase in fresh biomass and root length of watercress was used to evaluate the efficiency of materials added to the waste mixture. According to the obtained results, each modification of waste granular content significantly improved the properties of the mixture as a soil base. The increase in fresh biomass was observed for each mixture of waste and mineral substance and was higher than the increase in fresh biomass grown on the investigated waste. The modification of granular content of the soil base did not significantly affect on the length of the root system of the investigated plant. Some of the proposed materials used in these investigations to modify the properties of washery waste are waste materials, therefore their application in the reclamation process would be of economic as well as ecological importance.

**Keywords:** Zn-Pb washery waste, landfilling, remediation, organic and mineral waste, *Lepidium* test, phytotoxicity, modification of granular content

