

MOŻLIWOŚĆ ROLNICZEGO WYKORZYSTANIA ODPADÓW POEKSPLOATACYJNYCH I TERMICZNIE PRZETWORZONEJ BIOMASY

POSSIBILITY OF AGRICULTURAL USE OF POSTEXPLOITATION WASTE AND THERMALLY PROCESSED BIOMASS

Justyna Sobolczyk-Bednarek, Anna Choińska-Pulit, Dominika Kufka, Amelia Zielińska –
„Poltegor Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

DOI:10.5604/01.3001.0055.1285

Streszczenie

Niewłaściwa gospodarka rolna często skutkuje spadkiem jakości gleb, a to w konsekwencji prowadzi do obniżenia produkcji rolnej. Do najbardziej krytycznych problemów polskich gleb uprawnych można zaliczyć niską zawartość materii organicznej oraz wysoką kwasowość gleb (około 50% gleb jest silnie kwaśnych). Dobrym rozwiązaniem wpływającym na poprawę jakości gleby może być doglebowe stosowanie popiołów ze spalania materii organicznej lub odpadów z hałd pogórnich. Wymogi Unii Europejskiej coraz bardziej nastawione są w kierunku gospodarki o obiegu zamkniętym, zatem poszukiwanie metod rekultywacji gleb opartych na wykorzystaniu odpadów z innych gałęzi przemysłu jest wysoce właściwe.

Prezentowane badania mają na celu określenie właściwości odpadów takich jak lupek z wałbrzyskiej hałdy, wapno powstające po spalaniu odpadów drobiowych, popioły ze spalania osadu ściekowego, popioły ze spalania biomasy poubojowej oraz roślinnej, które umożliwiłyby ich zastosowanie doglebowe. Próbkę wyżej wymienionych odpadów poddano analizom fizykochemicznym oraz mikrobiotestom Phytotoxkit w celu określenia ich fitotoksyczności.

Przeprowadzone badania wykazały, że popioły ze spalania drobiu mogą stanowić wartościowy dodatek do gleby. Ponadto wykazano, że analizowane odpady mogą być wykorzystane jako składnik w mieszankach doglebowych komponowanych np. wraz z mineralnymi dodatkami, w celu uzupełnienia brakujących składników mineralnych.

Słowa kluczowe: odpady poeksploatacyjne, środki poprawiające jakość gleby, popioły

Abstract

Improper agricultural practices often lead to a decline in soil quality, which in turn results in reduced agricultural productivity. Among the most critical issues affecting Polish arable soils are the low content of organic matter and high soil acidity (around 50% of soils are strongly acidic). One promising solution to improve soil quality is the incorporation of ashes from the combustion of organic matter or waste from post-mining dumps into the soil. The European Union's regulations are increasingly focused on circular economy principles; therefore, exploring soil reclamation methods that utilize waste from other industries is highly appropriate.

The presented research aims to determine the properties of various waste materials — such as shale from the Wałbrzych spoil heap, lime derived from the combustion of poultry waste, ash from sewage sludge incineration, and ash from the combustion of slaughter and plant biomass—that would allow for their application in soil. Samples of the above mentioned waste materials were subjected to physicochemical analyses and microbiotest Phytotoxkit to assess their phytotoxicity.

The conducted studies demonstrated that poultry combustion ash can serve as a valuable soil amendment. Additionally, it was shown that the analyzed waste materials may be used as components in soil mixtures, combined for example with mineral additives, to supplement missing nutrients.

Keywords: post-exploitation waste, soil improvers, ashes

Wprowadzenie

Gleba jest tylko częściowo odnawialnym zasobem naturalnym, z którego korzystamy od stuleci. Człowiek może wprawdzie tworzyć lub odtwarzać gleby – jak choćby na terenach miejskich, czy hałdach pokopalnianych, ale sztucznie odtworzona gleba nie jest tym samym, co gleba stworzona siłami natury [9]. Około 52% gruntów eksploatowanych w celach rolniczych na świecie jest w umiarkowanym lub poważnym stopniu zdegradowane. Do najbardziej krytycznych problemów polskich gleb uprawnych można zaliczyć niską zawartość materii organicznej oraz wysoką kwasowość gleb (około 50% gleb jest silnie kwaśnych). Ponadto nadmierne stosowanie nawozów sztucznych doprowadziło do spadku żyzności dużej powierzchni gleb uprawnych. W ciągu ostatniej dekady polityka Unii Europejskiej ukierunkowana na rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym i efektywnego gospodarowania zasobami doprowadziła do mobilizacji środowiska naukowego, które poszukuje ekologicznych metod zagospodarowania zalegających, trudno zbywalnych i/lub szkodliwych dla środowiska odpadów [10]. Zrównoważone podejście do rolnictwa jest wysoce pożądane w celu wyeliminowania negatywnego wpływu nawozów chemicznych na zdrowie ludzi i środowisko, zapewniając jednocześnie zwiększenie plonów i jakości upraw, przy zastosowaniu alternatywnych rozwiązań, jakimi są ekologiczne dodatki do gleby [2].

Dobrym rozwiązaniem dla wzbogacenia gleby mogłyby okazać się popioły ze spalania materii organicznej [11]. Tym bardziej, że coraz większa ilość powstających popiołów wymusza konieczność ich ponownego wykorzystania, w celu minimalizowania strumienia odpadów kierowanego na składowiska [3]. Podczas ich zagospodarowania należy uwzględnić zasady zrównoważonego rozwoju, aby były uwzględnione interesy wszystkich stron. Wiąże się to również z faktem dużej zmienności właściwości popiołów, zależnej od wielu czynników, które mogą utrudnić ich wykorzystanie [12]. Fitopopioły stosowane były m.in. w Finlandii od 1935 roku, jako środek poprawiający właściwości gleby, szczególnie z przeznaczeniem dla drzew iglastych rosnących na torfowiskach drenowych [1]. Z jednej strony, popioły są źródłem składników pokarmowych (Ca, K, P, Mg, Zn, Cu, Fe, Mn) dla roślin, mają także właściwości odkwaszające, stanowią alternatywę dla nawozów mineralnych, natomiast z drugiej – zauważa się pewne niedogodności związane z zastosowaniem tych odpadów, a także zawartością w nich substancji szkodliwych (Tab.1), takich jak metale ciężkie (Pb, Cd, As, Hg) [3]. Obowiązujące krajowe regulacje prawne dopuszczają zastosowanie fitopopiołów lotnych o kodzie 10 01 03 do odzysku w procesie R10, a ich stosowanie w kierunku rolniczym lub leśnym możliwe jest tylko poprzez ich przetwarzanie w instalacjach lub urządzeniach spełniających odpowiednie warunki określone Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 [13].

Zatem potencjalne korzyści, wynikające ze stosowania polepszacza złożonego z odpadu organicznego po termicznym przetwarzaniu lub innych odpadów poeksploatacyjnych, to przede wszystkim poprawa żyzności oraz struktury gleby poprzez uzupełnienie niezbędnych składników odżywczych, wspomaganie aktywności mikrobiologicznej gleby oraz

wzrostu roślin, także poprzez zatrzymywanie wilgoci. Warto podkreślić, iż użyty w ten sposób odpad wpisuje się w zasady gospodarki o obiegu zamkniętym, tworząc technologię bezodpadową z korzyścią zarówno dla upraw, a tym samym dla środowiska [2].

Omówione wyżej zagadnienia wskazują na rosnącą potrzebę poszukiwania ekologicznych i ekonomicznych rozwiązań służących poprawie jakości gleb. Celem badań było określenie właściwości odpadów takich jak łupek z wałbrzyskiej hałdy, wapno powstające po spalaniu odpadów drobiowych, popioły ze spalania osadu ściekowego, popioły ze spalania biomasy poubojowej oraz roślinnej oraz ocenę możliwości ich ponownego wykorzystania w zastosowaniach rolniczych. Koncepcja niniejszych badań wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym promowaną przez Unię Europejską, szczególnie w kwestii efektywnego gospodarowania zasobami [10].

Metodyka badań

Material badawczy

Do badań wytypowano następujące materiały: wapno powstające w firmie produkującej drób, łupek z wałbrzyskiej hałdy, popiół z piór i kości kurzych, popiół ze spalania biomasy w elektrowni oraz popiół z osadów ściekowych z oczyszczalni ścieków w Krakowie, odpady z przetwarzania indyków, po procesie zgazowania. Odpady zostały rozdrobnione, przesiane do frakcji 2 mm. Następnie próbki odpadów przechowywano w temperaturze 20-25°C, w stanie powietrznie suchym.

Dla ułatwienia interpretacji otrzymanych rezultatów określono skrócone nazwy poszczególnych odpadów, które przedstawiają się następująco:

- K – gleba kontrolna,
- WP – CaO
- ŁP – łupek z hałdy wałbrzyskiej
- PI – odpady z przetwarzania indyków, po procesie zgazowania,
- PK – odpady z przetwarzania drobiu po spalaniu,
- PB – popiół ze spalania biomasy z elektrowni,
- O – osad z miejskiej oczyszczalni ścieków po spalaniu.

Metody

Analizy chemiczne

W laboratoriach badawczych Uniwersytetu Wrocławskiego próbki wyżej wymienionych odpadów poddano analizie elementarnej (C, H, N, S), badaniom na zawartość Te i Hg oraz składników biodostępnych (MgO, P₂O₅, K₂O), przeprowadzono charakterystykę SEM (ang. scanning electron microscope) w zakresie mikro- i mezoporów. Ponadto każdą próbkę poddano mineralizacji a otrzymane mineralizaty przekazano do „Poltegor-Institut”, gdzie poddano je oznaczeniu na zawartość metali ciężkich tj. Cr, Pb i Cd, metodą spektrometrii ICP-OES, na spektrometrze Optima 2000 DV, firmy Perkin Elmer.

Mikrobiotesty Phytotoxkit wraz z analizą obrazu

Kolejna część badawcza dotyczyła wykonania mikrobiotestów Phytotoxkit (test kiełkowania i wczesnego wzrostu roślin) badanych odpadów wraz z analizą obrazu. Do oceny fitotoksyczności skomponowano mieszaniny badanych próbek odpadów charakteryzujących się następującym składem: 97% gleby wraz z 3% dodatkiem odpadu. Tak przygotowane mieszaniny nawadniano do maksymalnej pojemności wodnej podanej przez producenta. Glebę kontrolną i mieszaniny testowe skomponowane z badanymi odpadami zwilżano wodą zgodnie z procedurą testu [5]. Przygotowane mieszaniny oraz kontrolę pozostawiono na okres 7 dni, aby zmieszane składniki mogły ulec wzajemnym reakcjom.

Ocenę fitotoksyczności mieszanin na rośliny przeprowadzono z wykorzystaniem testu kiełkowania i wczesnego wzrostu roślin Phytotoxkit, który umożliwia ocenę toksyczności próby opierając się na dwóch wskaźnikach wczesnego stadium rozwoju roślin: hamowanie kiełkowania nasion i inhibicja wzrostu korzeni w odniesieniu do próby kontrolnej (zgodnie z normą ISO 11269-1 [14]. Zasada działania fitotestu opiera się o kiełkujące nasiona sorga cukrowego (*Sorghum saccharatum*), rzeżuchy (*Lepidium sativum*) i gorczyca białej (*Sinapis alba*), które w wyniku kontaktu z badaną substancją wykazują specyficzną reakcję (brak kiełkowania lub redukcję długości korzeni). Wykorzystanie standardowych nasion umożliwia ujednolicenie testu i otrzymanie powtarzalnych wyników niezależnie od laboratorium, w którym wykonywane są badania [5].

Test Phytotoxkit wykonano zgodnie z zaleceniami producenta testu - firmę Microbiotest (Belgia). Glebę kontrolną stanowiła gleba uniwersalna o pH w granicach $6 \pm 0,5$. Aby wykonać badania kiełkowania, przygotowane mieszaniny gleby wraz z odpadami umieszczano w specjalnych plastikowych pojemnikach, które składały się z dwóch komór. Dolną komorę każdego pojemnika wypełniono badaną mieszaniną. Badania prowadzono w trzykrotnym powtórzeniu. Następnie na równomiernie rozłożoną uwodnioną glebę nakładano arkusz bibuły filtracyjnej, dołączony do zestawu. Kolejnym krokiem było rozłożenie na glebie nasion badanych gatunków roślin, tak aby zachować 1 cm odstęp od środkowej krawędzi plastikowego pojemnika. Po rozłożeniu nasion pojemniki nakrywano przezroczystą pokrywką i ustawiano pionowo w statywach. Następnie przygotowane testy inkubowano przez 72 h, w temperaturze ok 25°C. Konstrukcja wykorzystanych pojemników umożliwia bezpośrednią obserwację i pomiar długości korzenia metodą analizy obrazu po wykonaniu testu.

Wyniki badań

Wyniki analiz chemicznych

Zawartość N, C, S i H w odpadach przetworzonych termicznie (np. popiołach, czy osadzie z oczyszczalni ścieków) zależy nie tylko od rodzaju odpadów ale także technologii obróbki i jest ściśle zdeterminowana warunkami

procesu (np. temperatura, obecność tlenu). Analiza elementarna próbek odpadowej biomasy przetworzonej termicznie wykazała, że większość odpadów zawiera niskie zawartości kluczowych pierwiastków np. azotu (Tab.1). Wyjątek stanowią tu CaO i łupek z hałdy wałbrzyskiej, gdzie wartości były wyższe od pozostałych odpowiednio 0,35% i 0,48%. Zawartość węgla C w łupku z hałdy (TOC total organic carbon) oraz w CaO były wyższe w porównaniu do pozostałych odpadów i wynosiły odpowiednio 5,42% i 27,9%. Z kolei w popiołach węgiel resztkowy (C) jest zwykle niski (<10%), co potwierdziły wyniki uzyskane dla popiołów (0,48 – 1,81%). Podobnie jak w przypadku zawartości węgla, zawartość wodoru w łupku oraz w CaO jest wyższa, niż w popiołach (Tab. 1). Duża zawartość siarki w porównaniu do pozostałych badanych substratów odnotowano w CaO (9,28%) i w popiele z osadu z miejskiej oczyszczalni ścieków (3,09%).

Odpady odzwierzęce poddane przetwarzaniu termicznemu mogą stanowić bogate źródło fosforu, magnezu i wapnia, co czyni z nich potencjalny surowiec na nawozy/polepszacze fosforowe, jednak są mniej zasobne pod względem zawartości potasu w porównaniu z popiołami. Największą zawartość P_2O_5 (214 mg/kg) i MgO (893 mg/kg) (co odpowiada zawartości procentowej P_2O_5 (0,02%) i MgO (0,09%)) odnotowano w osadzie z miejskiej oczyszczalni ścieków, poddanym spalaniu (Tab. 1). Zawartość potasu w tym odpadzie jest jednak stosunkowo niska, w porównaniu np. z popiołami uzyskiwanymi z kości (3557 mg/kg).

Biorąc pod uwagę zawartość rtęci ($Hg < 2$ mg/kg) (Tab. 2) wszystkie badane odpady spełniały kryteria bezpieczeństwa stosowania opisane w Rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu [6]. Ustawa o nawozach i nawożeniu nie określa jednak dopuszczalnych wartości telluru w nawozach, jednak jego zawartość w badanych próbkach odpadów była poniżej granicy wykrywalności zastosowanej metody (<0,1 mg/kg) [15]. W przypadku chromu, jedynie popiół z osadów ściekowych nie spełniał wymogów normy - zmierzona wartość 134 mg/kg, podczas gdy dopuszczalna granica wynosi 100 mg/kg [15]. Pozostałe odpady w tym kryterium spełniają wytyczne określone w Rozporządzeniu [6]. Pod względem zawartości ołowiu wszystkie odpady spełniają normy. Z kolei zawartość kadmu w popiele ze spalania biomasy z elektrowni była na poziomie 30 mg/kg, co przekracza dopuszczalną wartość (5 mg/kg) [15]. W pracy Poluszczyńskiej i in. [7] w badanych popiołach z biomasy, zawartość metali ciężkich tj. chromu, ołowiu oraz rtęci była wyższa, niż w próbach własnych i mieściła się w zakresie odpowiednio 31-88 mg/kg, 35-230 mg/kg oraz 0,1-2,0 mg/kg. W publikacji tych samych autorów Cd był na niższym poziomie (1,2-19,9 mg/kg), natomiast w badaniach własnych wynosił 30 mg/kg [7].

Tab. 1. Analiza elementarna oraz składniki biodostępne w badanych odpadach
 Tab. 1. Elemental analysis and bioavailable components in the tested waste

Lp.	PRÓBA	N [%]	C [%]	H [%]	S [%]	P ₂ O ₅ [mg/kg]	K ₂ O [mg/kg]	MgO [mg/kg]
1	O	0,12	1,81	0,44	3,09	214	864	893
2	PB	0,09	0,48	0,28	0,76	31	54	41
3	PI	0,08	0,89	0,31	0,82	78	2710	49
4	PK	0,10	1,35	0,37	0,88	22	3557	60
5	CaO	0,35	5,42	1,31	9,28	6	2004	29
6	LP	0,48	27,90	1,76	0,98	1	217	422

Tab. 2. Zawartość metali w materiałach odpadowych
 Tab. 2. Metal content in waste materials

Lp.	PRÓBA	Hg [mg/kg]	Te [mg/kg]	Cr [mg/kg]	Pb [mg/kg]	Cd [mg/kg]
1	O	0,04	<0,1	134	62	6
2	PB	0,03	<0,1	15	30	30
3	PI	0,08	<0,1	77	28	1
4	PK	0,21	<0,1	63	21	1
5	CaO	0,0203	<0,1	2	49	2
6	LP	0,258	<0,1	22	47	4

Analiza porównawcza zdjęć z mikroskopu elektronowego (SEM)

Przeprowadzona analiza mikroskopowa SEM pozwoliła na ocenę morfologii różnych typów materiałów odpadowych. Przedstawiona Fot. 1 ukazuje wyraźnie zróżnicowaną morfologicznie strukturę powierzchni odpadu z przetwarzania termicznego indyków. Widoczne są zarówno obszary silnie spęczniałe, o porowatej i włóknistej fakturze, jak i fragmenty bardziej zbite i gładkie. Charakterystyczna dla tej próbki jest obecność mikroskopijnych struktur o kształcie nieregularnym, o dużej powierzchni właściwej. Mogą one wskazywać na znaczne nagromadzenie cząstek organicznych lub mineralnoorganicznych, które nie uległy pełnemu przekształceniu podczas procesu obróbki termicznej. Obserwowane mikrostruktury mogą działać jako matryca do wiązania składników odżywczych lub wilgoci, co sprawia, że materiał ten może być interesujący z punktu widzenia rolniczego wykorzystania.

Na zdjęciu przedstawiającym surowiec po termicznym przetwarzaniu odpadów drobiowych (Fot. 2), zaobserwowano strukturę o znacznej porowatości i nieregularnym uziarnieniu. Widoczne są liczne zagłębienia, jamki oraz nierównomierne aglomeraty cząstek. Taka budowa sugeruje wysoki stopień

niejednorodności fizycznej i potencjalnie chemicznej materiału. Duża powierzchnia właściwa, wynikająca z porowatości, może być korzystna przy zastosowaniu odpadu jako dodatku do gleby – szczególnie w kontekście retencji wody oraz zdolności buforowania składników odżywczych.

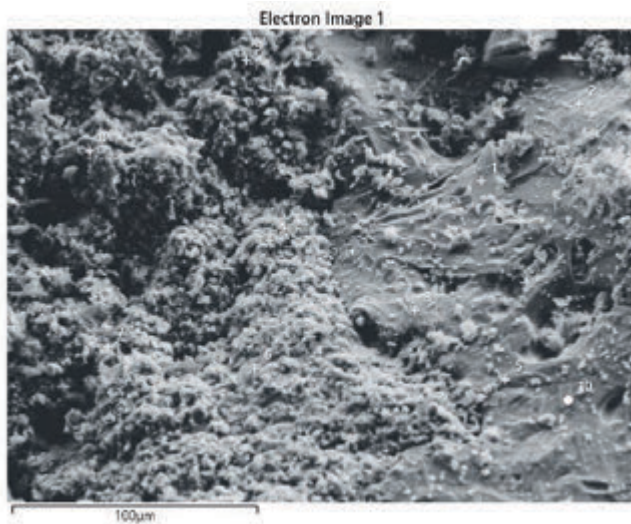
Fotografia, która przedstawia osad ściekowy po spalaniu (Fot. 3) ukazuje nieregularne aglomeraty cząstek o zróżnicowanej wielkości, tworzące umiarkowanie porowatą i ziarnistą strukturę. Powierzchnia tych aglomeratów jest szorstka i wydaje się składać z mniejszych, połączonych ze sobą elementów. Widoczne są liczne pory i przestrzenie między aglomeratami. Największe aglomeraty osiągają rozmiary rzędu kilkudziesięciu mikrometrów. Spalone osady ściekowe są potencjalnym źródłem składników odżywczych dla roślin, takich jak fosfor, potas czy mikroelementy. Struktura obserwowana na zdjęciu SEM może mieć wpływ na sposób, w jaki te składniki są uwalniane do gleby. Porowata struktura może sprzyjać retencji wody i dostępowi tlenu, co jest korzystne dla mikroorganizmów glebowych i korzeni roślin. Umiarkowana porowatość może sprzyjać adsorpcji i powolnemu uwalnianiu składników odżywczych. Z drugiej strony, obecność aglomeratów o większych rozmiarach może wpływać na jednorodność rozprzodzenia materiału w glebie.

Na następnej fotografii (Fot. 4) zaprezentowano strukturę popiołu z biomasy spalonej w elektrowni. Wykazano charakterystyczne zróżnicowanie w morfologii, w porównaniu do osadu ściekowego. Obserwujemy zarówno mniejsze, nieregularne cząstki, jak i większe, bardziej wydłużone struktury, przypominające fragmenty popiołu lotnego. Powierzchnia cząstek jest generalnie szorstka, ale wydaje się mniej porowata, niż w przypadku spalonego osadu ściekowego. Widoczne są również drobne, sferyczne cząstki osadzone na większych strukturach. Popioły z biomasy mogą być wykorzystywane jako dodatek do gleby, dostarczając potasu, wapnia i innych mikroelementów. Morfologia obserwowana na tym zdjęciu może wpływać na reaktywność popiołu w glebie i tempo uwalniania składników odżywczych. Mniejsze cząstki mogą mieć większą powierzchnię właściwą, co potencjalnie przyspiesza ich rozpuszczanie i uwalnianie pierwiastków. Większe, bardziej stabilne struktury mogą zapewniać wolniejsze uwalnianie składników. Obecność sferycznych cząstek może wskazywać na specyficzne procesy spalania i potencjalnie wpływać na właściwości fizyczne gleby, takie jak przepuszczalność.

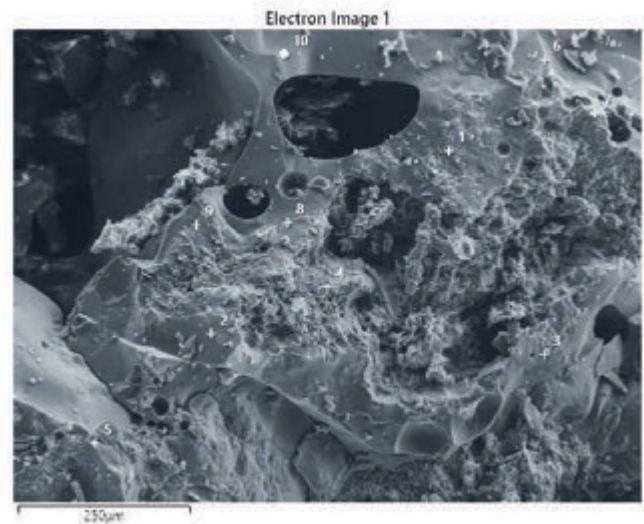
Na kolejnym zdjęciu (Fot. 5) przedstawiono wapno powstające w firmie produkującej drób. Uwidoczniona

jest znacznie bardziej rozdrobniona i jednorodna struktura. Dominują drobne cząstki o kulistym lub nieregularnym kształcie, tworzące luźne skupiska. Taka morfologia jest typowa dla wapna technicznego (np. CaO lub $\text{Ca}(\text{OH})_2$), charakteryzującego się wysoką reaktywnością chemiczną i szybkim działaniem w środowisku glebowym. Rozdrobnienie cząstek sprzyja ich efektywnemu rozproszeniu i łatwemu uwalnianiu jonów wapniowych, co czyni ten materiał szczególnie przydatnym do odkwaszania gleb o niskim pH.

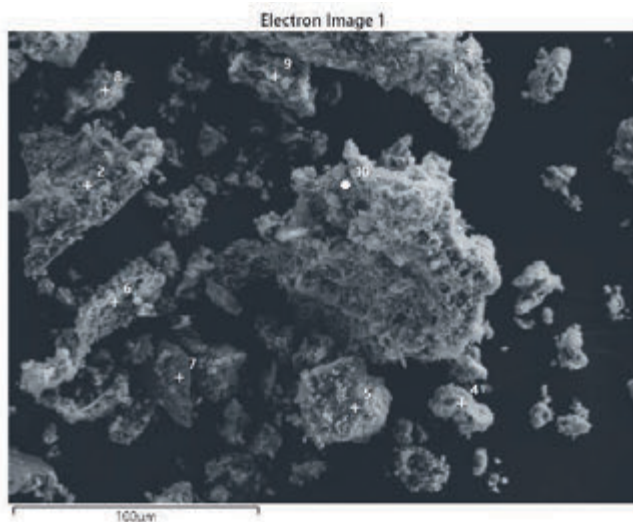
Ostatnie zdjęcie (Fot. 6) prezentuje morfologię łupków z hałdy wałbrzyskiej i przedstawia nieregularne, zbite agregaty o laminowanej strukturze, charakterystycznej dla materiałów ilastych i łupków. Powierzchnia jest stosunkowo gładka w porównaniu do poprzednich próbek, z widocznymi spękaniem i warstwami. Poszczególne płatki łupka są ściśle przylegające do siebie, tworząc mniej porowatą strukturę zewnętrzną. Łupki, w tym te z hałd, mogą być rozważane jako dodatek do gleby w celu poprawy jej właściwości fizycznych, takich jak struktura i retencja wody. Laminowana struktura obserwowana na zdjęciu SEM sugeruje, że materiał ten może mieć zdolność do zatrzymywania wody między swoimi warstwami. Jednakże, niska porowatość zewnętrzna może ograniczać przepuszczalność powietrza i wody w glebie, jeśli



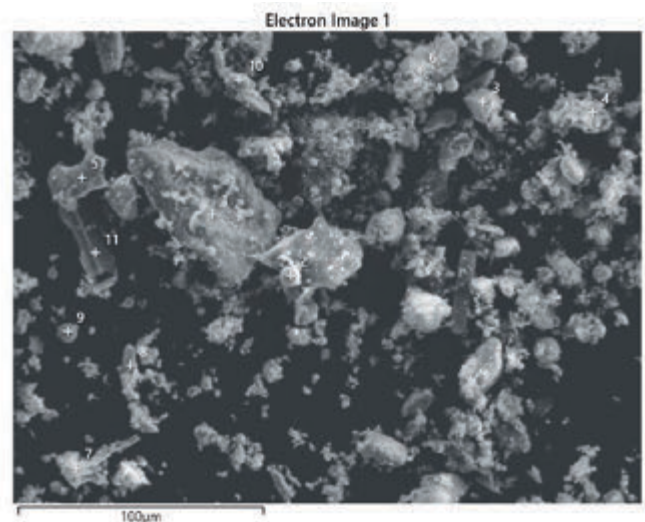
Fot. 1. SEM-PI
Phot. 1. SEM-PI



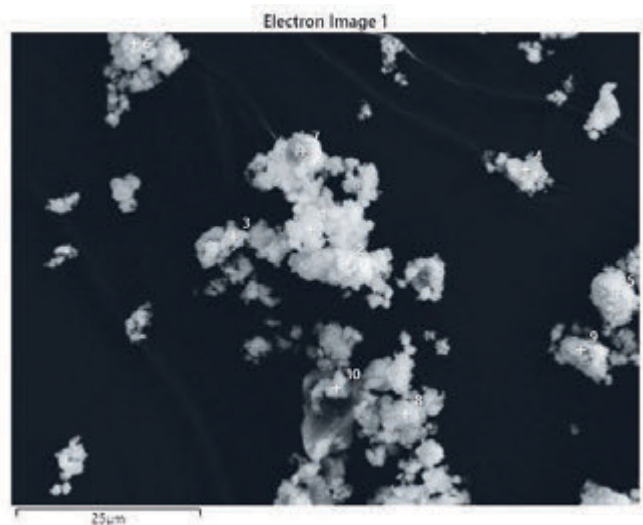
Fot. 2. SEM-PK
Phot. 2. SEM-PK



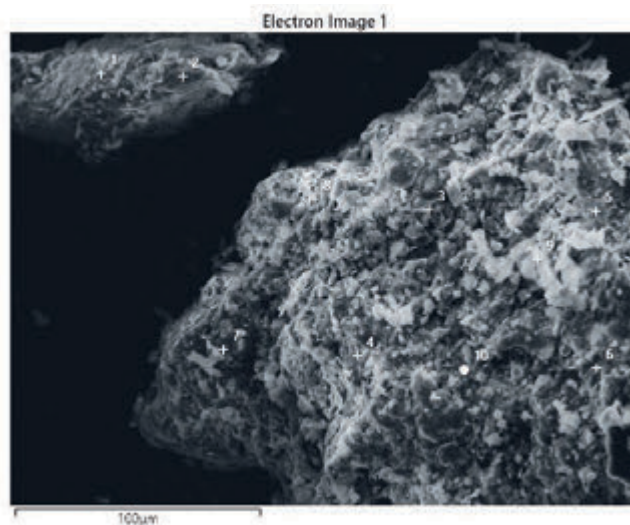
Fot. 3. SEM- O
Phot. 3. SEM- O



Fot. 4. SEM- PB
Phot. 4. SEM- PB



Fot. 5. SEM- CaO
Phot. 5. SEM- CaO



Fot. 6. SEM- LP
Phot. 6. SEM- LP

materiał ten stanowi znaczną część jej objętości. Ponadto, łupki z hałd mogą zawierać podwyższone stężenia metali ciężkich i innych zanieczyszczeń, co stanowi potencjalne ryzyko dla środowiska i zdrowia roślin.

Analiza mikroskopowa różnych materiałów wykazała znaczące różnice w ich strukturze morfologicznej, co sugeruje odmienny potencjał i wyzwania związane z ich zastosowaniem w rolnictwie. Badane materiały wykazują cechy, które mogą być korzystne w kontekście ich zastosowania jako dodatków poprawiających właściwości gleb. Odpady drobiowe jak i spalony osad ściekowy, ze względu na swoją porowatość i złożoną strukturę, mogą pełnić funkcję nośnika materii organicznej i mikroelementów, szczególnie istotna może być ich zdolność do poprawy retencji wody i zwiększania aktywnej powierzchni dla procesów mikrobiologicznych. Popiół z biomasy charakteryzuje się bardziej złożoną morfologią, co może przekładać się na różny sposób interakcji z glebą i uwalniania składników odżywczych. Natomiast wapno, dzięki wysokiej reaktywności, może skutecznie pełnić funkcję odkwaszającą. Łupek z hałdy wałbrzyskiej, ze swoją laminowaną strukturą, może potencjalnie poprawiać retencję

wody w glebie. Jednakże, jego niska porowatość zewnętrzna i wysokie ryzyko zanieczyszczenia metalami ciężkimi wymagają bardzo ostrożnej oceny.

Mikrobiotest ostrej toksyczności odpadów wraz z analizą obrazu

Przykładowe zdjęcia mikrobiotestów poddawanych analizie umieszczono na Fotografiiach 7-13. Zaobserwowano, że w przypadku sorgo w eksperymencie negatywny wpływ miały dwa odpady: CaO oraz popiół z osadu (Tab. 3). Największe hamowanie wzrostu korzenia w przypadku wszystkich odpadów zaobserwowano dla gorczycy. Żaden z odpadów nie wpływał negatywnie na wzrost rzeżuchy.

Otrzymany wynik wygląda obiecująco w kontekście testów jakie przeprowadzili Poranek i in. 2020 [8], gdzie przeprowadzona analiza fitotoksyczności z wykorzystaniem rzeżuchy ogrodowej wykazała wysoką toksyczność popiołu lotnego oraz dennego, a także niską toksyczność żużlu, który do celów badawczych został uprzednio poddany obróbce mechanicznej do frakcji 0-2 mm [8].

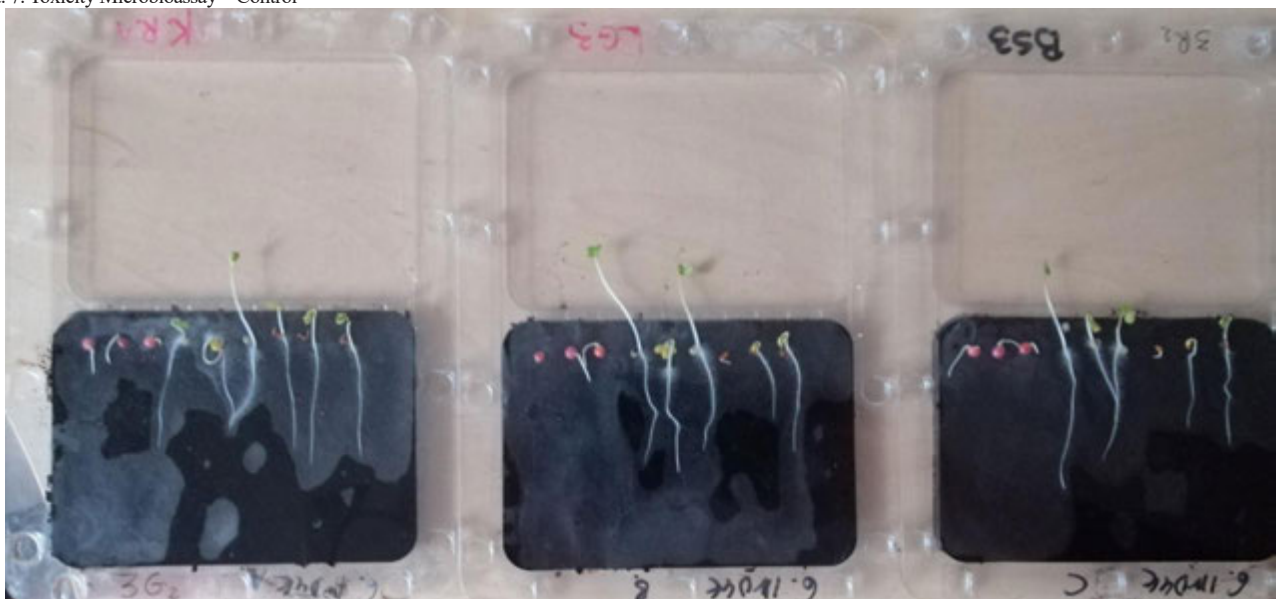
Tab. 3. Procentowe zahamowanie wzrostu korzenia badanych roślin
Tab. 3. Percentage inhibition of root growth of the tested plants

Nazwa odpadu	Zahamowanie wzrostu korzenia [%]		
	Sorgo	Gorczyca	Rzeżucha
PK	-2,13	37,62	-33,05
PB	-61,70	15,59	-15,87
PI	-210,64	11,63	-10,88
O	0	18,07	-10,88
WP	14,89	24,50	-12,55
LP	-89,36	36,63	-13,39

*Wynik ujemny wskazuje na zwiększenie wzrostu korzenia badanych gatunków roślin względem próbki kontrolnej. Wynik dodatni wskazuje na hamowanie wzrostu korzenia badanych gatunków roślin względem próbki kontrolnej.



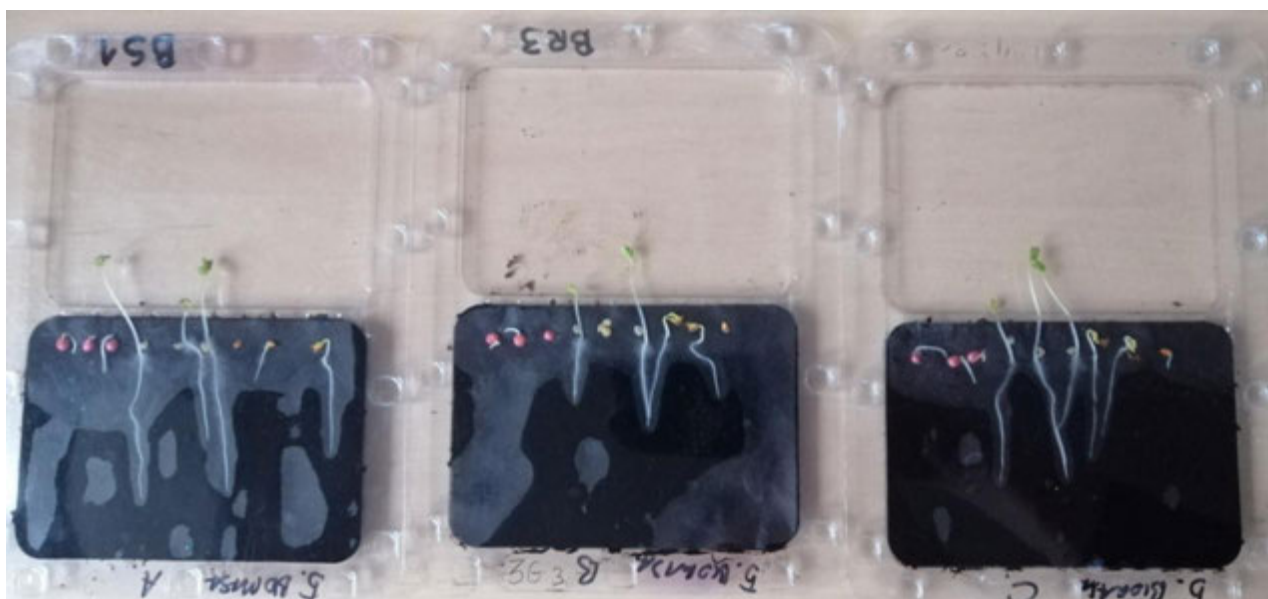
Fot. 7. Kontrola (K) mikrobiotestu ostrej toksyczności
Phot. 7. Toxicity Microbioassay – Control



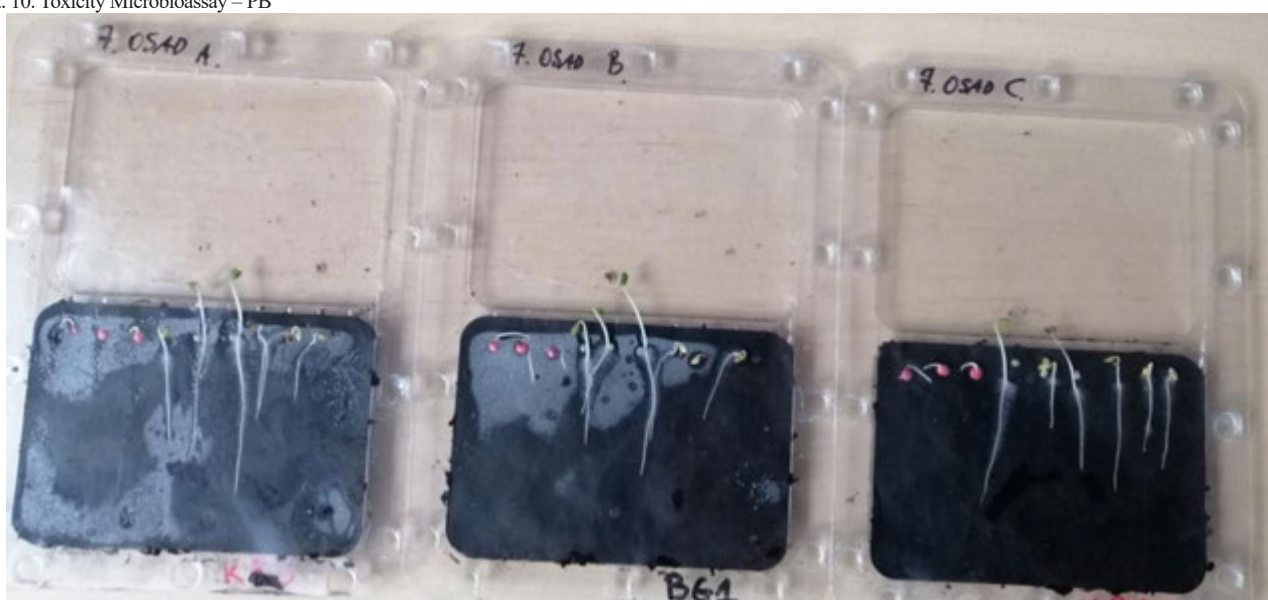
Fot. 8. PI w testach ostrej toksyczności
Phot. 8. Toxicity Microbioassay – PI



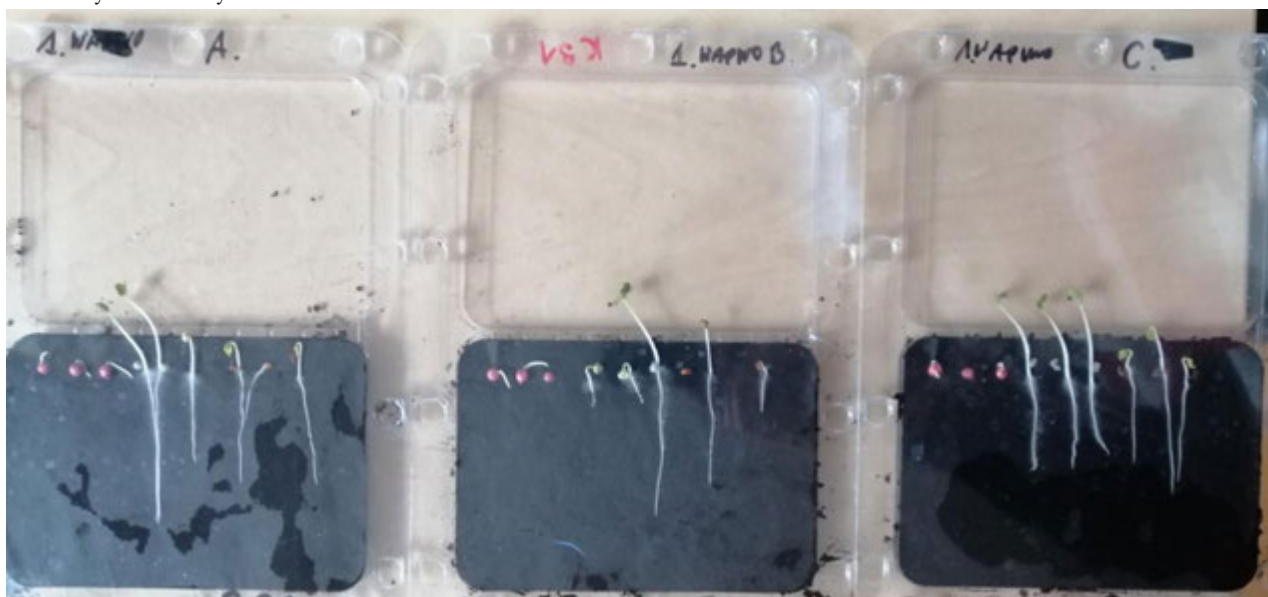
Fot. 9. PK w testach ostrej toksyczności
Phot. 9. Toxicity Microbioassay – PK



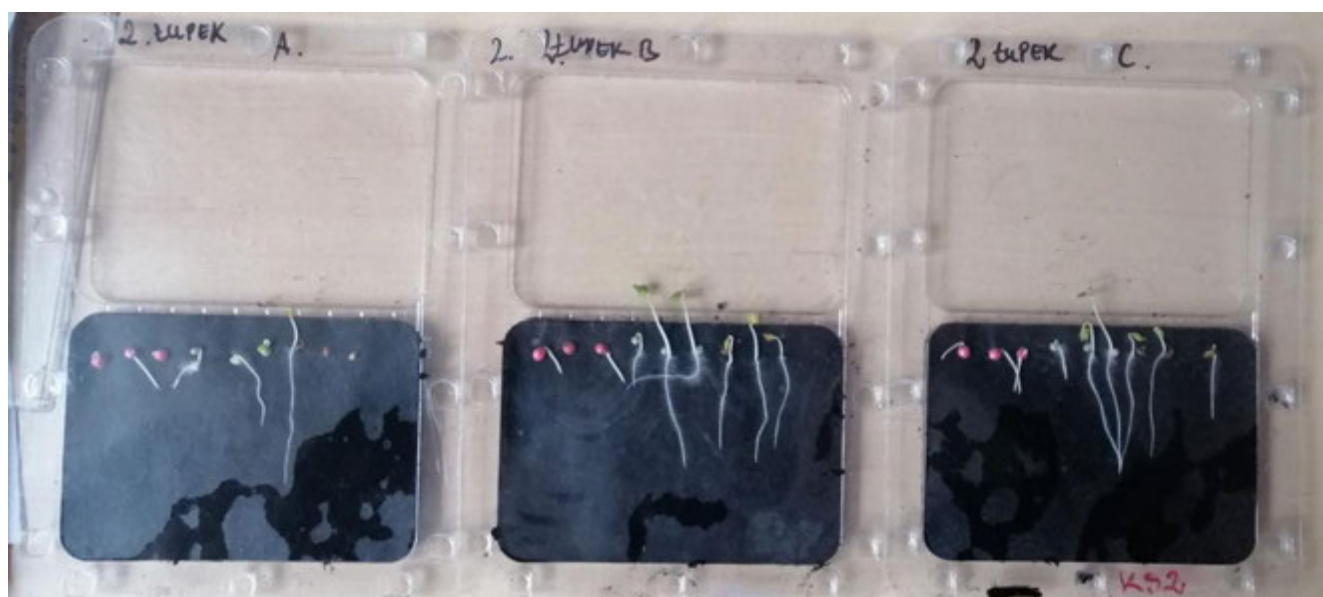
Fot. 10. PB w testach ostrej toksyczności
Phot. 10. Toxicity Microbioassay – PB



Fot. 11. O w testach ostrej toksyczności
Phot. 11. Toxicity Microbioassay – O



Fot. 12. WP w testach ostrej toksyczności
Phot. 12. Toxicity Microbioassay – WP



Fot. 13. ŁP w testach ostrej toksyczności
 Phot. 13. Toxicity Microbioassay – ŁP

Podsumowanie

Analiza elementarna próbek odpadowej biomasy przetworzonej termicznie wykazała, że większość odpadów zawiera niskie zawartości kluczowych pierwiastków tj. azot i siarka. Jedynie w osadzie z miejskiej oczyszczalni ścieków (po spaleniu) oraz w wapnie powstającym po spaleniu odpadów drobiowych stwierdzono istotnie wysoką zawartość siarki. Badając zawartość metali ciężkich tj. kadmu, chromu i ołowiu, w testowanych materiałach stwierdzono, że odpad z przetwarzania drobiu, odpad z przetwarzania indyków oraz wapno spełniają wytyczne Rozporządzenia Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 31 października 2024 r. Natomiast łupek z hałdy wałbrzyskiej oraz popiół z osadu z miejskiej oczyszczalni ścieków zawierały podwyższone wartości metali ciężkich. Jedynie popiół z biomasy przekracza normatywne wartości kadmu, w związku z tym nie zaleca się zastosowania tego materiału do wytwarzania środka wspomagającego wzrost roślin.

Testy fitotoksyczności wykazały, że wszystkie odpady hamowały wzrost nasion gorczycy, natomiast większość promowała kiełkowanie nasion sorgo oraz rzeżuchy, jedynie wapno z termicznego przetwarzania odpadów drobiowych nieznacznie hamowało wzrost sorgo.

Większość testowanych odpadów może znaleźć zastosowanie jako dodatki do wzbogacania gleb (jednoskładnikowe) lub jako pojedynczy komponent wzbogacany innymi składnikami.

Na podstawie uzyskanych wyników można przypuszczać, że odpowiednio dobrane proporcje analizowanych składników odpadowych wraz z materiałami mineralnymi pozwolą na otrzymanie mieszanki mineralnej, która korzystnie wpłynie na właściwości chemiczne, fizyczne, fizykochemiczne lub biologiczne gleby. Kolejny etap badań powinien obejmować wytworzenie mieszanek mineralnych oraz analizę ich składu pod kątem zawartości substancji toksycznych, mogących wpływać na zanieczyszczenie środowiska glebowego.

Badania wykonane w ramach prac statutowych nr 30/26/19-7-018/N oraz 30/26/19-7-019/N

Literatura

- [1] Markowski G. 2018. *Gospodarcze wykorzystanie popiołów po spalaniu węgla kamiennego i biomasy*, Eunomia 2(95)/2018
- [2] Komisja Europejska, Europejski Zielony Ład, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pl, 24.11.2020
- [3] Jean Diatta J. Kowalski M. 2017. *Popioły ze spalania biomasy roślinnej (fitopopioły) – recykling i agrochemiczny potencjał*. XXIV Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, 2017
- [4] PHITOTOKKIT TM- MicroBioTests Inc., Mariakerke (Gent), Belgia
- [5] PHYTOTOKKIT. *Test kiełkowania nasion i wczesnego wzrostu roślin. Standardowa procedura*. Tigret Sp. z o.o. Warszawa
- [6] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 sierpnia 2024 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu. Poz. 1261
- [7] Poluszyńska J., Ślęzak E. 2015. *Charakterystyka popiołów ze spalania biomasy i ocena możliwości ich wykorzystania w celach przyrodniczych*. Prace ICiMB 2015 nr 23
- [8] Poranek N., Ścierski W., Czajkowski A., Pikoń K., Łażniewska-Piekarczyk B. 2020. *Ocena toksyczności ubocznych produktów spalania z termicznego przekształcania frakcji komunalnej z zastosowaniem rzeżuchy (*Lepidium sativum*)*. Współczesne Problemy Ochrony Środowiska i Energetyki 2020, 281-288
- [9] Karczewska A. 2012. *Ochrona gleb i rekultywacja terenów zdegradowanych. wyd. ii poprawione, rozszerzone*. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, ISBN 978-83-7717-113-4
- [10] Marczak D., Lejcuś K., Kulczycki G., Misiewicz J. 2022. *Towards circular economy: Sustainable soil additives from natural waste fibres to improve water retention and soil fertility*. Science of The Total Environment, 844 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157169>
- [11] Diatta, J. 2019. *Evaluation of Phyto-ashes for Agri-environmental Goals -A Novel Approach Case Study*. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 22. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.22.556097>
- [12] Diatta, J., Kowalski, M. 2017. *Popioły ze spalania biomasy roślinnej (fitopopioły) – recykling i agrochemiczny potencjał*. XXIV Międzynarodowa Konferencja Popioły z Energetyki, 2017
- [13] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10 (poz. 132)
- [14] PN-EN ISO 11269-1:2013-06 – Jakość gleby. Oznaczanie wpływu zanieczyszczeń na florę glebową. Część I: Metoda pomiaru hamowania wzrostu korzeni
- [15] Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2024 r. poz. 105)

