

SARA CIAPA

AGH Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Katedra Inżynierii Środowiska, e-mail: saraciapa@agh.edu.pl, ORCID:0009-0009-2716-9491

**WYBRANE PROBLEMY Z ZAKRESU OCENY FITOTOKSYCZNOŚCI
POPIOŁÓW Z PRZEMYSŁU ENERGETYCZNEGO – ZARYS
TEMATYKI W ASPEKTCIE DYDAKTYCZNYM**

Abstrakt: Popioły z przemysłu energetycznego należą do ubocznych produktów spalania, a ich właściwości fizykochemiczne determinują zarówno potencjalne zagrożenie dla środowiska, jak i możliwości wtórnego wykorzystania. Celem artykułu jest syntetyczna analiza wyników wybranych badań nad fitotoksycznością popiołów energetycznych oraz ocena przydatności testów roślinnych w ocenie ryzyka środowiskowego, związanego z wprowadzaniem popiołów do środowiska. Przegląd literatury wskazuje, że oddziaływanie popiołów na rośliny jest zróżnicowane i zależne od pochodzenia popiołów, ich składu chemicznego, dawki, właściwości gleby, do której popioły są wprowadzone, a przede wszystkim od gatunku rośliny testowej. Niskie dawki popiołów mogą stymulować wzrost roślin, natomiast wyższe prowadzą do efektów toksycznych związanych z wysokim pH, zawartością chlorków i siarczanów oraz akumulacją metali ciężkich. Zastosowanie standaryzowanych testów fitotoksyczności umożliwia szybką i powtarzalną ocenę wpływu popiołów na procesy życiowe roślin, a więc pośrednio także na środowisko glebowe i wspiera potencjał ich bezpiecznego wykorzystania, zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: popioły energetyczne, fitotoksyczność, biotesty roślinne, ryzyko środowiskowe

**SELECTED ISSUES IN THE ASSESSMENT OF PHYTOTOXICITY OF ENERGY
INDUSTRY ASH – AN OUTLINE OF THE TOPIC IN A DIDACTIC CONTEXT**

Abstract: Ash from the energy industry belongs to the group of combustion by-products whose physicochemical properties determine both their potential environmental hazards and the possibilities for their secondary use. The aim of this article is to provide a synthetic analysis of selected research results concerning the phytotoxicity of energy ash and to assess the usefulness of plant-based tests in evaluating environmental risks associated with introducing ash into the environment. A review of the literature indicates that the impact of ash on plants is varied and depends on the origin of the ash, their chemical composition, dosage, the properties of the soil into which the ash is introduced, and, most importantly, the species of the test plant. Low doses of ash may stimulate plant growth, whereas higher doses lead to toxic effects related to high pH, chloride and sulfate content, as well as accumulation of heavy metals. The use of standardized phytotoxicity tests enables rapid and reproducible assessment of the influence of ash on plant life processes, and thus indirectly on the soil environment, supporting their potential safe use in accordance with the principles of sustainable development.

Keywords: energy ash, phytotoxicity, plant bioassays, environmental risk assessment

I. WSTĘP

W procesach spalania zachodzących w elektrowniach oraz elektrociepłowniach powstają popioły energetyczne, stanowiące uboczne produkty spalania (UPS). Wśród nich możemy wyróżnić popioły lotne oraz popioły dennie. Popioły lotne są drobnymi cząstkami stałymi, które unoszą się wraz z gazami spalinowymi, są one najczęściej separowane na odpylaczach lub elektrofiltrach (Czop i in., 2019). Popioły dennie są natomiast cząstkami ciężkimi, które opadają na dno paleniska (Kojder i Śliwka, 2020). Ze względu na swój skład chemiczny, ilość oraz efekty nowych technologii spalania (np. kotły fluidalne), nowe paliwa (np. zróżnicowana biomasa), pojawiające się popioły stanowią coraz poważniejsze wyzwanie środowiskowe. Metale ciężkie, związki nieorganiczne oraz inne substancje toksyczne, które wchodzą w skład popiołów energetycznych mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla ekosystemów glebowych i wodnych, zwłaszcza w przypadku niewłaściwego składowania lub wykorzystania wtórnego bez uprzedniej oceny potencjalnego ryzyka (Alengebawy i in., 2021). Z drugiej strony, popioły lotne oraz popioły dennie mogą stanowić także cenny surowiec, który może zostać wykorzystany w różnych dziedzinach gospodarki, powodując tym samym redukcję odpadów oraz zmniejszenie ich negatywnego wpływu na środowisko (Yi i in., 2024). Wzrost ilości odpadów pochodzących z działalności przemysłowej, w tym z energetyki, górnictwa oraz przetwórstwa metali, stanowi istotne zagrożenie dla jakości środowiska glebowego. Odpady te, często bogate w metale ciężkie i inne związki toksyczne, niewłaściwie składowane lub wykorzystywane w niekontrolowany sposób, mogą stawać się przyczyną długotrwałego pogorszenia właściwości fizykochemicznych gleb oraz zaburzeń w funkcjonowaniu ekosystemów (Alengebawy i in., 2021; Pandey i Singh, 2010).

Jednym z kluczowych aspektów oceny przydatności popiołów jest ich fitotoksyczność, czyli wpływ na wzrost, rozwój oraz fizjologię roślin. Popioły mogą działać na nie stymulująco lub toksycznie – głównie z powodu obecności w ich składzie metali ciężkich i różnych ksenobiotyków. W kontekście oceny ryzyka środowiskowego oraz planowania działań rekultywacyjnych coraz większe znaczenie zyskuje kompleksowe podejście obejmujące analizy fizykochemiczne oraz testy biologiczne. Biotesty roślinne, stanowią nieinwazyjne i szybkie narzędzie do określania stopnia toksyczności odpadów oraz ich potencjalnego wpływu na organizmy (Traczewska, 2011; Jasiewicz i in., 2010). Analiza reakcji roślin na kontakt z odpadami stanowi cenne źródło informacji o potencjalnym ryzyku środowiskowym oraz możliwościach wykorzystania danego materiału w procesach rekultywacji lub zagospodarowania (Alengebawy i in., 2021).

W kontekście rosnących wyzwań środowiskowych istotne znaczenie ma również ustawiczna edukacja przyrodnicza. Dynamiczne zmiany w technologiach energetycznych, gospodarce odpadami oraz rosnące znaczenie wdrażania zasad zrównoważonego rozwoju wymagają, aby nauczyciele szkół średnich, zarówno ogólnokształcących jak i technicznych, systematycznie aktualizowali swoją wiedzę oraz przekazywali uczniom informacje dotyczące ryzyka środowiskowego i zrównoważonego rozwoju. Włączenie zagadnień związanych z oceną fitotoksyczności i ryzykiem środowiskowym do procesu dydaktycznego sprzyja kształtowaniu świadomych i odpowiedzialnych postaw wobec transformacji energetycznej.

Celem artykułu jest syntetyczny zarys wybranych badań dotyczących fitotoksyczności popiołów energetycznych oraz ocena przydatności testów roślinnych jako narzędzi wspomagających ocenę ryzyka środowiskowego i planowania ich zrównoważonego wykorzystania.

II. METODA BADAŃ

Artykuł ma charakter przeglądowy i opiera się na analizie międzynarodowej literatury naukowej dotyczącej popiołów energetycznych, ich właściwości fizykochemicznych, oddziaływania na środowisko oraz zastosowania roślin jako bioindykatorów ich toksyczności środowiskowej.

Przegląd literatury przeprowadzono z wykorzystaniem międzynarodowych baz naukowych: Scopus, Web of Science oraz Google Scholar. Wyszukiwanie obejmowało artykuły badawcze i prace przeglądowe bez założonego przedziału lat opublikowania, ze szczególnym uwzględnieniem publikacji dotyczących zastosowania biotestów roślinnych w ocenie oddziaływania popiołów energetycznych. Zastosowano kombinację słów kluczowych: *phytotoxicity, bioindicators, plants, fly ash, bottom ash, ecotoxicological tests, Phytotoxkit, environmental risk assessment, plant bioassays, sustainable development*.

Do analizy włączono publikacje naukowe zgodne z problematyką oceny ryzyka środowiskowego i zrównoważonego gospodarowania odpadami energetycznymi. Prace ograniczające się wyłącznie do analiz chemicznych nie były uwzględniane podczas przeprowadzanej analizy.

III. PRZEGŁĄD WYNIKÓW WYBRANYCH BADAŃ

Wyniki wybranych badań nad fitotoksycznością popiołów energetycznych

Analiza badań dotyczących popiołów energetycznych wskazuje na to, że ich właściwości fizykochemiczne oraz wpływ na rośliny jest zróżnicowany i zależy od wielu czynników, którymi są: rodzaj paliwa, technologia spalania, warunki magazynowania oraz sposób aplikacji popiołów do gleby. Popioły pochodzące z węgla kamiennego oraz brunatnego charakteryzują się wysoką zawartością tlenków krzemu, glinu, wapnia i żelaza, natomiast popioły z biomasy zawierają większe ilości potasu, magnezu i fosforu, co może nadawać im właściwości nawozowe (Vassilev i in., 2012).

Popioły energetyczne, niezależnie od pochodzenia, cechują się wysokim pH, często przekraczającym 10, co wpływa na odczyn gleby oraz dostępność i przyswajalność pierwiastków. Na zawartość metali ciężkich w glebie wpływa zarówno rodzaj materiałów, z których powstają popioły energetyczne, jaki i technologia ich spalania (Izquierdo i Querol, 2012). Wysokie pH może działać korzystnie w przypadku gleb kwaśnych, jednak w glebach o odczynie obojętnym lub zasadowym prowadzi do zaburzeń równowagi jonowej i ograniczenia przyswajalności mikroelementów, a to może wywoływać objawy stresu fizjologicznego u roślin (Pandey i Singh, 2010; Rahmawati i in., 2020; Alengebawy i in., 2021).

Badania ekotoksykologiczne wykonywane na roślinach wyższych są podstawową metodą służącą do określenia wpływu zanieczyszczenia gleb m.in. metalami ciężkimi oraz innymi substancjami toksycznymi obecnymi w środowisku na żywe organizmy, a także bioakumulacji tych zanieczyszczeń w łańcuchach troficznych. Do najczęściej akumulujących się pierwiastków należą metale takie jak: kadm, ołów, rtęć, arsen, chrom, nikiel, miedź oraz cynk, które występują w popiołach pochodzących z energetyki w formach potencjalnie mobilnych i biodostępnych (Izquierdo i Querol, 2012; Vassilev i in., 2012). Ilościowa ocena stopnia akumulacji zanieczyszczeń pochodzenia energetycznego w organizmach opiera się na zastosowaniu współczynników bioakumulacyjnych. Najczęściej stosowanym parametrem jest współczynnik bioakumulacji (*BAF – Bioaccumulation Factor*), który jest definiowany jako stosunek stężenia danej substancji (np. metalu) w organizmie do jej stężenia w środowisku (w glebie, wodzie lub w osadach), przy uwzględnieniu wszystkich dróg narażenia. W badaniach dotyczących transferu metali w łańcuchach troficznych stosuje się współczynnik biomagnifikacji (*BMF – Biomagnification Factor*), który opisuje relację

stężeń pomiędzy konsumentem, a jego pokarmem, a także współczynnik magnifikacji troficznej (TMF – *Trophic Magnification Factor*), który jest wyznaczany na podstawie zależności pomiędzy logarytmem stężenia metalu, a pozycją troficzną organizmu. Wszystkie powyższe parametry są powszechnie wykorzystywane w ocenie ryzyka środowiskowego związanego z obecnością popiołów pochodzących z przemysłu energetycznego. Umożliwiają one identyfikację pierwiastków szczególnie istotnych z punktu widzenia długoterminowego oddziaływania na ekosystemy (Borga i in., 2012).

Ocena przydatności testów roślinnych jako narzędzi wspomagających ocenę ryzyka środowiskowego i planowania zrównoważonego wykorzystania popiołów

Można wyróżnić szereg testów biologicznych, które są oparte na analizie toksycznego oddziaływania substancji na organizmy roślinne. Wykorzystywane do badań testy fitotoksyczności pozwalają na szybkie uzyskanie wyników, są tanie, a także stosunkowo łatwe do wykonania. Dzięki temu stanowią podstawowe narzędzie w ocenie ekotoksyczności np. zanieczyszczonych gleb pobranych na terenach zdegradowanych chemicznie (Kojder i Śliwka, 2020, prace niepublikowane) czy odpadów mineralnych z górnictwa i energetyki. Sama reakcja roślin na popioły energetyczne jest nieliniowa i zależy od ich dawki. W literaturze wskazuje się, że niewielkie dodatki popiołów do podłoża mogą stymulować wzrost roślin poprzez dostarczanie składników mineralnych, natomiast wyższe dawki prowadzą do zahamowania kiełkowania nasion oraz elongacji korzeni w wyniku nadmiernego zasolenia lub obecności metali ciężkich. Przykładowo wykazano, że wzrost udziału popiołów lotnych w podłożu, powyżej 20-30% może powodować istotne ograniczenie wzrostu części nadziemnych i systemu korzeniowego wybranych gatunków roślin uprawnych (Bożym i in., 2021). Dobór roślin oraz testu powinien uwzględniać możliwą prognozę otrzymanych wyników oraz możliwość ich odniesienia do innych grup roślin, takich jak rośliny uprawne, gatunki dziko rosnące, czy rośliny wykorzystywane w rekultywacji terenów zdegradowanych. Do najczęściej wykorzystywanych gatunków roślin testowych należą: rajgras angielski (*Lolium perenne*), ryż (*Oryza sativa*), owies (*Avena sativa*), pszenica (*Triticum aestivum*), rzepak (*Brassica napus*), sałata (*Lactuca sativa*) oraz rzeżucha (*Lepidium sativum*) (Traczewska, 2011; Jakubus i Tatuśko, 2015). Gatunki te są powszechnie stosowane w ogólnych testach fitotoksyczności, natomiast w badaniach dotyczących toksyczności popiołów energetycznych szczególnie często wykorzystuje się rośliny o szybkim czasie kiełkowania i wysokiej wrażliwości na zmiany właściwości podłoża (Phytotoxkit™). Testy pozwalają na ocenę nieletalnych efektów toksycznych, jak na przykład zahamowanie elongacji (wydłużenia) korzeni siewek, ocenę zmian (zaburzeń) fizjologicznych lub rozwojowych, w tym także morfologicznych (Traczewska, 2011).

Standardowa metoda OECD wykorzystująca między innymi rośliny testowe wspomniane wyżej, stanowi jedno z kluczowych narzędzi oceny potencjalnego wpływu substancji chemicznych na proces kiełkowania oraz wczesny rozwój siewek. Na koniec cyklu przeprowadzanych badań określa się ilość biomasy, a także wizualnie ocenia efekty szkodliwe; tj. chlorozę, nekrozę, deformacje czy zahamowanie wzrostu (OECD, 2003; Traczewska, 2011). Zastosowanie tej metody w kontekście odpadów energetycznych wykazało, że przy zastosowaniu niskich dawek popiołów lotnych pochodzących ze spalania węgla kamiennego obserwowano poprawę wzrostu biomasy roślin, intensyfikację procesu fotosyntezy oraz lepszy rozwój systemu korzeniowego wybranych roślin (Szatyłowicz i Krasowska, 2020). Świadczy to o potencjale popiołów do użycia ich jako dodatku poprawiającego właściwości gleb zdegradowanych (Szatyłowicz i Krasowska, 2020). Natomiast przy wyższych dawkach popiołów obserwowano zaburzenia gospodarki wodnej roślin, uszkodzenia tkanki korzeniowej oraz akumulację metali ciężkich w ich częściach

nadziemnych. Rośliny jednoliścienne takie jak pszenica (*Triticum aestivum*) i ryż (*Oryza sativa*), wykazywały większą tolerancję na obecność popiołów niż rośliny dwuliścienne, np. sałata (*Lactuca sativa*) czy rzeżucha (*Lepidium sativum*), co sugeruje możliwość ich wykorzystania w rekultywacji terenów poprzemysłowych (Kim i Kazonich, 2004).

Metodyka oceny fitotoksyczności materiałów glebowych i odpadów, w tym popiołów energetycznych, została opracowana w oparciu o normy PN-ISO 11269-1:1998 oraz PN-ISO 11269-2:2001, będące polską implementacją międzynarodowych standardów ISO opracowanych przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną (ISO) w zakresie badań wpływu substancji na kiełkowanie i wzrost roślin. Normy te określają wymagania dotyczące przygotowania próbek, doboru gatunków testowych, warunków prowadzenia doświadczeń oraz sposobu interpretacji wyników. Badania pozwalają na ocenę wpływu badanego materiału na kiełkowanie nasion, wczesny wzrost siewek oraz ocenę wpływu badanego materiału na wzrost roślin w dłuższym okresie, obejmującym najczęściej od kilku do kilkunastu dni obserwacji, w zależności od zastosowanego gatunku testowego i metody badawczej. Analiza obejmuje zarówno rozwój części nadziemnych, jak i systemu korzeniowego (PN-ISO, 1998; PN-ISO, 2001; Traczewska, 2011; Tatuśko-Krygier i Jakubus, 2019).

Standardowe fitotesty są często czasochłonne i wymagają dużego nakładu pracy, dlatego coraz częściej zastosowanie w ocenie fitotoksyczności popiołów energetycznych znajdują szybkie i zminiaturyzowane testy, takie jak Phytotoxkit™. Test ten opiera się na analizie reakcji trzech gatunków roślin modelowych charakteryzujących się wysoką wrażliwością na zmiany właściwości badanego podłoża: są to - sorgo (*Sorghum saccharatum*), rzeżucha (*Lepidium sativum*) oraz gorczyca biała (*Sinapis alba*). Na podstawie ich reakcji wyznacza się stopień zahamowania kiełkowania i wzrostu w próbce badanej względem kontroli, stanowiącej glebę referencyjną o wysokiej zawartości materii organicznej (Phytotoxkit™; Romanowska-Duda i in., 2010). Badania przy użyciu testu Phytotoxkit™ wykazały m.in., że popioły pochodzące z palenisk domowych i niskiej emisji powodowały silną inhibicję wzrostu korzeni rzeżuchy (*Lepidium sativum*) oraz gorczycy (*Sinapis alba*), prowadząc odpowiednio do 48% i 62% zahamowania w porównaniu z próbą kontrolną. Autorzy badań podkreślili, że toksyczność ta była skorelowana z wysokim pH (11,2) oraz podwyższoną przewodnością elektryczną roztworu glebowego (Czop i in., 2016).

W ostatnich latach obserwowany jest wzrost liczby badań dotyczących wpływu popiołów energetycznych na rośliny użytkowe oraz lecznicze. Badania wykazały, że przy zastosowaniu odpowiednich dawek, popiół może poprawiać wzrost roślin leczniczych (Singh i in., 2025). Inne badania pokazują, że popiół w połączeniu z cyjanobakteriami zwiększa wzrost pszenicy i ryżu nawet o 10-15% (Upadhyay i Dubey, 2024). Oznacza to, że istnieje możliwość synergii między popiołami energetycznymi oraz mikroorganizmami glebowymi. Wspomniane powyżej badania wskazują, że popioły energetyczne mogą być stosowane w środowisku glebowym przy doborze odpowiedniej dawki oraz przy uwzględnieniu lokalnych warunków.

Fitotoksyczność popiołów energetycznych jest zjawiskiem wieloczynnikowym, a jej ocena powinna obejmować zarówno krótkoterminowe testy kiełkowania, jak i długoterminowe analizy biomasy, akumulacji metali oraz zmian właściwości gleby.

IV. PODSUMOWANIE

Popioły energetyczne stanowią potencjalnie wartościowy materiał do zastosowań środowiskowych, jednak ich wykorzystanie wymaga szerokiej analizy, w tym szczegółowej oceny fitotoksyczności i ryzyka środowiskowego. Badania wskazują, że niskie dawki popiołów mogą działać korzystnie na rośliny, natomiast wyższe dawki prowadzą do toksyczności związanej z zasoleniem, wysokim pH i akumulacją metali ciężkich. Zwykle

więc, wskazane jest stosowanie zarówno analiz chemicznych, jak i testów biologicznych oraz monitorowanie długoterminowych zmian zachodzących pod wpływem wprowadzenia popiołów energetycznych do gleby. Tylko takie podejście pozwala na bezpieczne i zrównoważone wykorzystanie popiołów w gospodarce o obiegu zamkniętym.

Przedstawione metody biologiczne stanowią istotne narzędzie w analizie wpływu zanieczyszczeń antropogenicznych na środowisko glebowe. Testy fitotoksyczności oparte na wykorzystaniu nasion i siewek różnych gatunków roślin dostarczają powtarzalnych i porównywalnych informacji o stopniu oddziaływania substancji chemicznych, w tym metali ciężkich i innych toksyn na procesy wzrostu i rozwoju roślin. Ich zaletą jest prostota wykonania, stosunkowo krótki czas na uzyskanie wyników oraz możliwość bezpośredniego przełożenia rezultatów na realne warunki środowiskowe. Dzięki temu testy te znajdują szerokie zastosowanie zarówno w badaniach naukowych, jak i w praktyce inżynierskiej, szczególnie przy ocenie jakości gleb zdegradowanych, materiałów odpadowych oraz w procesach rekultywacji terenów poprzemysłowych.

Z punktu widzenia oceny ryzyka środowiskowego popioły energetyczne wymagają podejścia wieloaspektowego, łączącego analizy chemiczne, testy biologiczne oraz ocenę mobilności zanieczyszczeń. Wyniki badań wskazują, że sama analiza składu chemicznego nie jest wystarczająca do oceny bezpieczeństwa środowiskowego - konieczne jest stosowanie testów fitotoksyczności, które pozwalają na ocenę realnego wpływu np. popiołów na rośliny. Zastosowanie standaryzowanych metod, takich jak PN-ISO 11269-1:1998 oraz PN-ISO 11269-2:2001, zapewnia porównywalność wyników oraz ich wysoką wartość interpretacyjną w kontekście oceny ryzyka środowiskowego. Inne rozwiązania, takie jak testy Phytotoxkit™, pozwalają na zwiększenie efektywności badań dzięki ograniczeniu czasu analizy i ilości materiału niezbędnego do badań, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej czułości i powtarzalności wyników. Jest to jednocześnie cenne narzędzie w szybkim wykrywaniu potencjalnych zagrożeń dla środowiska glebowego, związanych m.in. z toksycznym oddziaływaniem metali ciężkich i niekorzystnymi zmianami właściwości fizykochemicznych podłoża.

Podsumowując, popioły energetyczne mogą być wykorzystywane w środowisku glebowym, jednak ich zastosowanie musi być poprzedzone rzetelną oceną ryzyka, uwzględniającą zarówno krótkoterminowe, jak i długoterminowe skutki. Właściwie przeprowadzona analiza pozwala na bezpieczne wykorzystanie popiołów w rekultywacji, rolnictwie czy inżynierii środowiska, wpisując się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Jednocześnie konieczne jest prowadzenie dalszych badań nad stabilizacją pochodzących z popiołów energetycznych metali ciężkich, optymalizacją wprowadzanych dawek oraz wpływem popiołów na mikrobiom glebowy, aby w pełni wykorzystać ich potencjał przy minimalizacji ryzyka środowiskowego.

Powyższe, krótkie zestawienie informacji może spełnić zadanie edukacyjne, wypełniając rolę pierwszego sygnału dla wielu nauczycieli i ich uczniów, zainteresowanych problematyką ewolucji energetycznej i jej środowiskowymi skutkami. Powinno także uświadomić złożoność zagadnienia i konieczność szerokiej kontroli konsekwencji działań gospodarczych człowieka, w tym prowadzących do powstawania popiołów z przemysłu energetycznego.

BIBLIOGRAFIA

Alengebawy A., Abdelkhalek S.T., Qureshi S.R., Wang M.Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*. Feb 25. 9(3).42.

- Baran A., Jasiewicz C. (2013). Use of Phytotoxkit™ test in assessment of toxicity of soils polluted with zinc. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu - Rolnictwo*. 107. 7-17.
- Baran A., Śliwka M., Lis M. (2013). Selected properties of flotation tailings wastes deposited in the Gilów and Żelazny Most waste reservoirs regarding their potential environmental management. *Archives of Mining Sciences*. 3. 969-978.
- Behera M.C., Lachungpa O., Mohanty T.L. (2020). Impact of Fly Ash on Germination and Initial Seedling Growth of *Leucaena leucocephala* (Lam.) De Wit. *Indian Journal of Ecology*. 47(1). 117-122.
- Borgå K., Kidd K.A., Muir D.C., Berglund O., Conder J.M., Gobas F.A., Kucklick J., Malm O., Powell D.E. (2012). Trophic magnification factors: considerations of ecology, ecosystems, and study design. *Integr Environ Assess Manag*. 8(1). 64-84.
- Bożym M., Król K., Mizerna K. (2021). Leachate and contact test with *Lepidium sativum* L. to assess the phytotoxicity of waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18. 1975-1990.
- Czop M., Czoch D., Karol A., Maduzia A. (2016). Badanie fitotoksyczności popiołu z zabudowy niskiej na wybranej grupie roślin. *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska*. 18(3). 9-20.
- Datsenko V., Khimenko N. (2016). Evaluation of heavy metal complex phytotoxicity, *Eurasian Journal of Soil Science*. 5(3). 249-254.
- Gajić G., Djurdjević L., Kostić O., Jarić S., Mitrović M., Pavlović P. (2018). Ecological Potential of Plants for Phytoremediation and Ecorestoration of Fly Ash Deposits and Mine Wastes. *Frontiers in Environmental Science*. Volume 6-2018. 1-24.
- Izquierdo M., Querol X. (2012). Leaching behaviour of elements from coal combustion fly ash: An overview. *International Journal of Coal Geology*. 94. 54-66.
- Jakubus M. (2012). Evaluation of compost by selected chemical and biological methods. *Fresenius Environmental Bulletin* 21. 11a. 3464-3472.
- Jakubus M.B., Tatuśko N. (2015). Przegląd wybranych biologicznych metod oceny stanu środowiska naturalnego. *Inżynieria Ekologiczna*. 42. 78-86.
- Jasiewicz C., Baran A., Antonkiewicz J. (2010). Zastosowanie testu Phytotoxkit™ w ocenie gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. *Innowacyjne rozwiązania rewitalizacji terenów zdegradowanych*. Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego. Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych. 94-100.
- Kim A.G., Kazonich G. (2004). The Silicate/non-silicate distribution of metals in fly ash and its effect on solubility. *Fuel*. 83. 2285-2292.
- Kojder K., Śliwka M. (2020). Ocena możliwości wykorzystania popiołów ze spalania biomasy w rekultywacji biologicznej. *Polish Journal for Sustainable Development*. 24(2). 63-70. DOI: 10.15584/pjsd.2020.24.2.7.
- Kozak J., Włodarczyk-Makuła M. (2016). Ogólna charakterystyka metod biologicznej kontroli jakości środowiska. *LAB Laboratoria, Aparatura, Badania*. 21(6). 22-27.
- Marecik R., Króliczak P., Cyplik P. (2006). Fitoremediacja - alternatywa dla tradycyjnych metod oczyszczania środowiska. *Biotechnologia*. 3(74). 88-97.
- Mohamed H.I., Ullah I., Toor M.D., Tanveer N.A., Din M.M.U., Basit A., Sultan Y., Muhammad M., Rehman M.U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review. *Bioresour Bioprocess*. 4. 12(1). 95.
- OECD. (2003). Guideline for the testing of chemicals: Proposal for a new Guideline 227. *Terrestrial Plant Test: Vegetative Vigour Test*.

- Pandey V.C., Singh N. (2010). Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 136(1-2). 16-27.
- PN-ISO 11269-1: 1998. Jakość gleby. Oznaczanie wpływu zanieczyszczeń na florę glebową. Metoda pomiaru hamowania wzrostu korzeni.
- PN-ISO 11269-2: 2001. Jakość gleby. Oznaczanie wpływu zanieczyszczeń na florę glebową. Wpływ związków chemicznych na wschody i wzrost roślin wyższych.
- Phytotoxkit™. Test kiełkowania i wczesnego wzrostu roślin. Standardowa procedura obsługi.
- Rahmawati N., Sutopo N., Nuraini Y., Handayanto E. (2020). Phytotoxicity of coal fly ash on plant growth and heavy metal uptake by plant in an acid soil. *Journal Of Degraded And Mining Lands Management*. 7(3). 2233-2240.
- Romanowska-Duda Z.B., Grzesik M., Kalaji H.M. (2010). Phytotoxkit test in growth assessment of corn as an energy plant fertilized with sewage sludge. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*. 73-81.
- Singh J., Raj S., Kaur S.P. (2025). Exploration of the utilization of fly ash in medicinal plant cultivation. *Frontiers in Sustainability*. 1-11.
- Szatyłowicz E., Krasowska M. (2020). Assessment of heavy metals leaching from fly ashes as an indicator of their agricultural use. *Desalination and Water Treatment*. 199. 288-296.
- Tatuśko-Krygier N., Jakubus M. (2019). Application of biological methods to assess the toxicity of soils contaminated with heavy metals and the effectiveness of stabilisation processes. *Environment Protection Engineering*. 33-43.
- Tołoczko W., Wyrwicka-Drewniak A., Spała R. (2023). Przydatność biotestu Phytotoxkit do badania zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. *Acta Universitatis Lodzensis. Folia Geographica Physica*. 22. 65-83.
- Traczewska T. (2011). Biologiczne metody oceny skażenia środowiska. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*.
- Upadhyay N., Dubey A. (2024). Effect of Coal Fly Ash and Cyanobacteria on Different Crops. *International Journal of Research in Engineering and Science*. 12(7). 80-84.
- Van der Vliet L., Velicogna J., Princz J., Scroggins R. (2012). Phytotoxkit: a critical look at a rapid assessment tool. *Environ. Toxicol. Chem*. 31(2). 316-323.
- Vassilev S.V., Baxter D., Andersen L.K., Vassileva C., Morgan T. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 94. 1-33.
- Yi C., Yingjie F., Yu H., Xiaoling L., Wenfeng X., Tao Z. (2024). A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 269.