

BIULETYN

Mineralogia, petrologia i geochemia w Polsce



Od Redakcji

Koleżanki i Koledzy,

Oddajemy w Wasze ręce kolejny numer Biuletynu "Mineralogia, petrologia i geochemia w Polsce", w którym dzielimy się najnowszymi osiągnięciami naukowców związanych z szeroko rozumianymi naukami mineralogicznymi.

W tym wydaniu przybliżamy fascynujące badania nad wykorzystaniem mikroorganizmów w pozyskiwaniu metali z ubogich rud. Autorzy tekstu przekonują, że biohydrometalurgia otwiera przed nauką i przemysłem nowe możliwości – bardziej przyjazne środowisku i często skuteczniejsze niż tradycyjne metody.

Drugi tekst dotyczy tematyki bliskiej naszej codzienności – a mianowicie badań nad popiołami pochodzącymi z domowych palenisk i elektrociepłowni. Choć to materiały, które zwykle kojarzymy wyłącznie z odpadami, okazuje się, że kryją w sobie zarówno wyzwania środowiskowe, jak i potencjał do ponownego wykorzystania, np. w produkcji betonu czy odzysku metali ziem rzadkich.

Na końcu znajdują Państwo zaproszenie do udziału w konkursie Polskiego Towarzystwa Mineralogicznego na najlepsze prace dyplomowe – to doskonała okazja, by młodzi badacze mogli zaprezentować swoje osiągnięcia.

Życzymy inspirującej lektury!

Zespół redakcyjny Biuletynu

W numerze:

Bakterie z pomocą górnictwu i środowisku, czyli
biołogowanie rud miedzi

STRONY 2-3

Badania mineralogiczno-geochemiczne popiołów w kontekście ich stabilności w środowisku glebowym

STRONY 4-6

Konkurs PTMin na najlepsze prace dyplomowe, z zakresu nauk mineralogicznych –
Edycja 2025

STRONA 7

Redaguje zespół w składzie:
Jakub Kierczak (red. nacz.)
Janusz Janeczek
Monika Kusiak
Marek Michalik
Anna Pietranik

Napisz do nas:
biuletyn.ptmin.knm@gmail.com

Bakterie z pomocą górnictwu i środowisku, czyli bioługowanie rud miedzi

W miarę jak ludzkość coraz intensywniej eksploatuje zasoby naturalne, złoża bogate w metale stają się coraz rzadsze. To zmusza przemysł do sięgania po surowce uboższe i trudniejsze w obróbce. W odpowiedzi na to wyzwanie, w drugiej połowie XX wieku narodziła się nowatorska technologia: biohydrometalurgia.

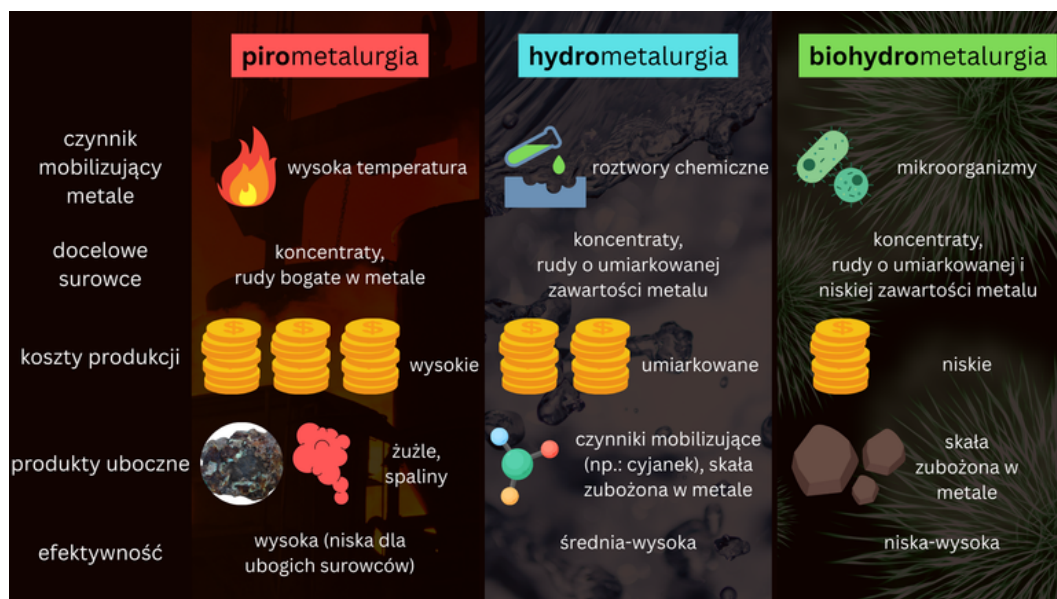
Biohydrometalurgia to metoda pozyskiwania metali z rud przy udziale mikroorganizmów – głównie bakterii. W przeciwieństwie do tradycyjnych technik, takich jak pirometalurgia (gdzie rudy są przetwarzane w wysokich temperaturach) czy hydrometalurgia (gdzie wykorzystuje się roztwory chemiczne), tutaj całą pracę wykonują żywe organizmy.

Bakterie te potrafią „wyciągać” metale nawet z bardzo ubogich rud. W dodatku robią to w sposób znacznie bardziej przyjazny dla środowiska: nie emitują toksycznych gazów, zużywają mniej energii, a ilość szkodliwych odpadów jest znacznie mniejsza niż w klasycznych metodach.

To właśnie te zalety sprawiły, że biohydrometalurgia znalazła zastosowanie w przemyśle – m.in. przy przetwarzaniu rud miedzi czy złota. Szczególnie dobrze sprawdza się tam, gdzie inne metody okazują się zbyt kosztowne lub mało efektywne. Procesy biologiczne są jednak zwykle wolniejsze niż reakcje chemiczne czy termiczne, a ich efektywność może spadać, jeśli warunki środowiskowe przestaną sprzyjać bakteriom. Zdarza się, że aktywność mikroorganizmów jest hamowana przez toksyczne pierwiastki albo powstawanie minerałów wtórnych, wytrącających się w trakcie reakcji.

Dlatego też naukowcy na całym świecie intensywnie pracują nad udoskonaleniem tych technik – tak, by w przyszłości mikroorganizmy mogły jeszcze skuteczniej pomagać w odzyskiwaniu cennych metali z trudnych złóż.

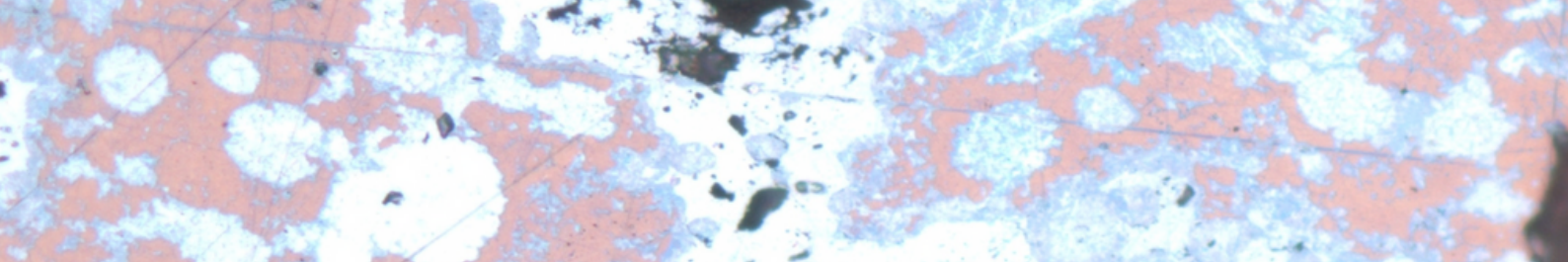
Tematyką bioługowania (jedną z odmian biohydrometalurgii) zajmuje się również zespół badaczy z Uniwersytetu Wrocławskiego, w składzie Mateusz Wolszczak (obecnie Uniwersytetu Karlova w Pradze), Anna Potysz oraz Grzegorz Lis we współpracy z Arielem Wojciszewiczem (KGHM Polska Miedź S.A.) oraz Marcinem Siepakiem (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu).



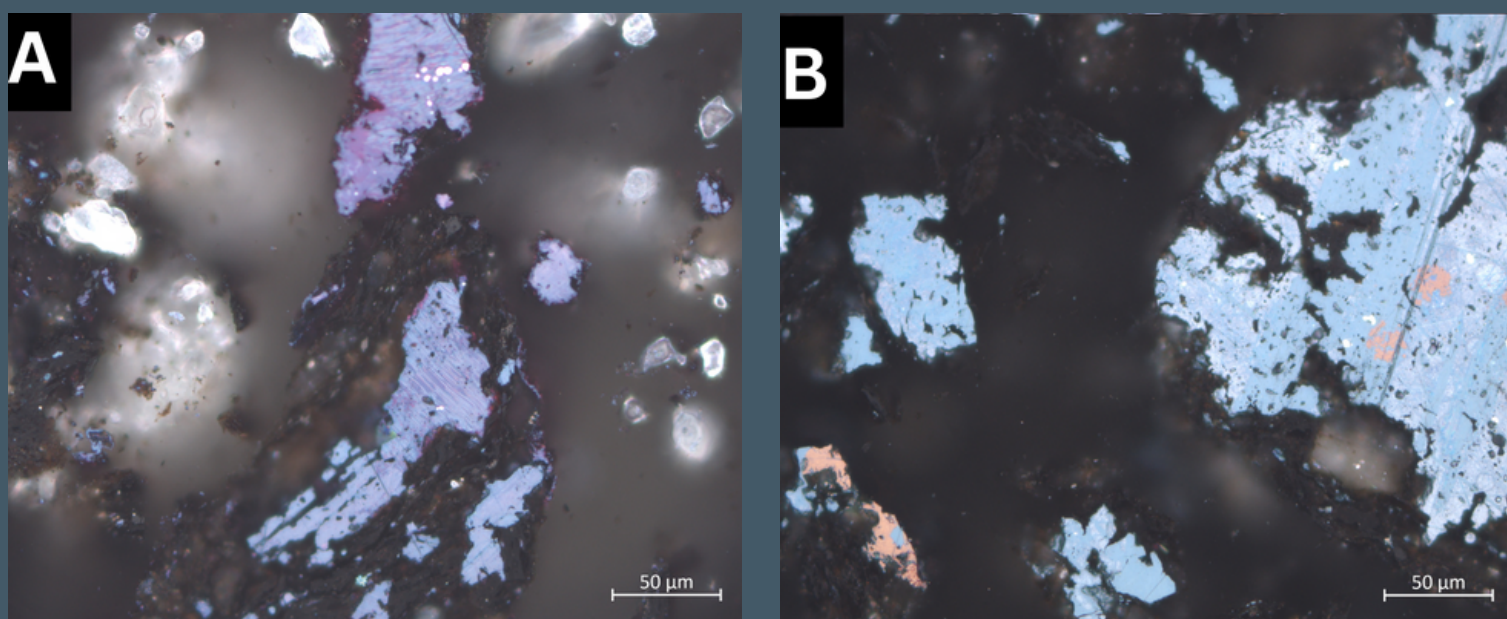
Ryc. 1. Porównanie cech piro-, hydro- i biohydrometalurgii.

Przedmiotem badań wspomnianych naukowców są łupki miedzionośne, które cechuje bardzo duża zmienność pod względem mineralogii oraz zawartości cennych metali. Ponadto niektóre z ich składników (np.: kopalna materia organiczna) mogą utrudniać proces przetwórczy, co czyni łupki dobrymi kandydatami do biohydrometalurgicznego przetwarzania.

Badania eksperymentalne obejmowały ocenę potencjału bioługującego dla dwóch różnych bakterii: *Acidithiobacillus thiooxidans* (bakteria generująca kwas siarkowy) oraz *Pseudomonas fluorescens* (bakteria wydzielająca związki organiczne o powinowactwie do różnych metali) wobec próbek łupka miedzionośnego o zróżnicowanym składzie chemicznym i mineralnym.



Pomimo finalnych uzysków metali wciąż dalekich od oczekiwanych po procesie przemysłowym, wiele ciekawych i użytecznych dla przyszłych badań wniosków zostało zaobserwowanych. Aktywność bakterii *P. fluorescens* wobec miedzi oraz molibdenu była znacznie wyższa w porównaniu z aktywnością *A. thiooxidans*. Ponadto dla jednej próbki traktowanej bakterią *A. thiooxidans* zaobserwowano nietypowe przemiany siarczków miedzi widocznych (w świetle odbitym przy zastosowaniu olejku immersyjnego) w postaci purpurowo-czerwonych powierzchni o wyraźnie mniejszym stosunku miedzi do siarki. Sugeruje to wtórne wytrącenia siarczków ubogich w miedź, które mogą się zachowywać jako tzw. warstwa pasywacyjna (warstwa osłaniająca powierzchnię siarczku przed czynnikami ługującymi metale, skutecznie blokująca dalszą ekstrakcję metali), zwłaszcza że dla *P. fluorescens* osiągnięto lepsze uzyski miedzi przy braku takich powierzchni na siarczkach (Ryc. 2).



Ryc. 2. Powierzchnie siarczków Cu (szereg chalkozyn-digenit) po ługowaniu roztworem zawierającym: (A) *A. thiooxidans* oraz (B) *P. fluorescens*.

Dodatkowo zaobserwowano, iż aktywność bakterii *P. fluorescens* wobec ługowania metali została utrzymana pomimo braku pożywki organicznej (niezbędnej dla tej bakterii do funkcjonowania), co pozostawia sugestie jakoby kopalna materia organiczna mogła służyć jako dostateczna pożywka organiczna podczas procesu bioługowania, co potencjalnie pozwoliłoby obniżyć koszty procesu.

Szczegółowe omówienie zaprezentowanych badań zostało zawarte w niedawno opublikowanym artykule: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2025.109555> (Wolszczak i in., 2025, Minerals Engineering).

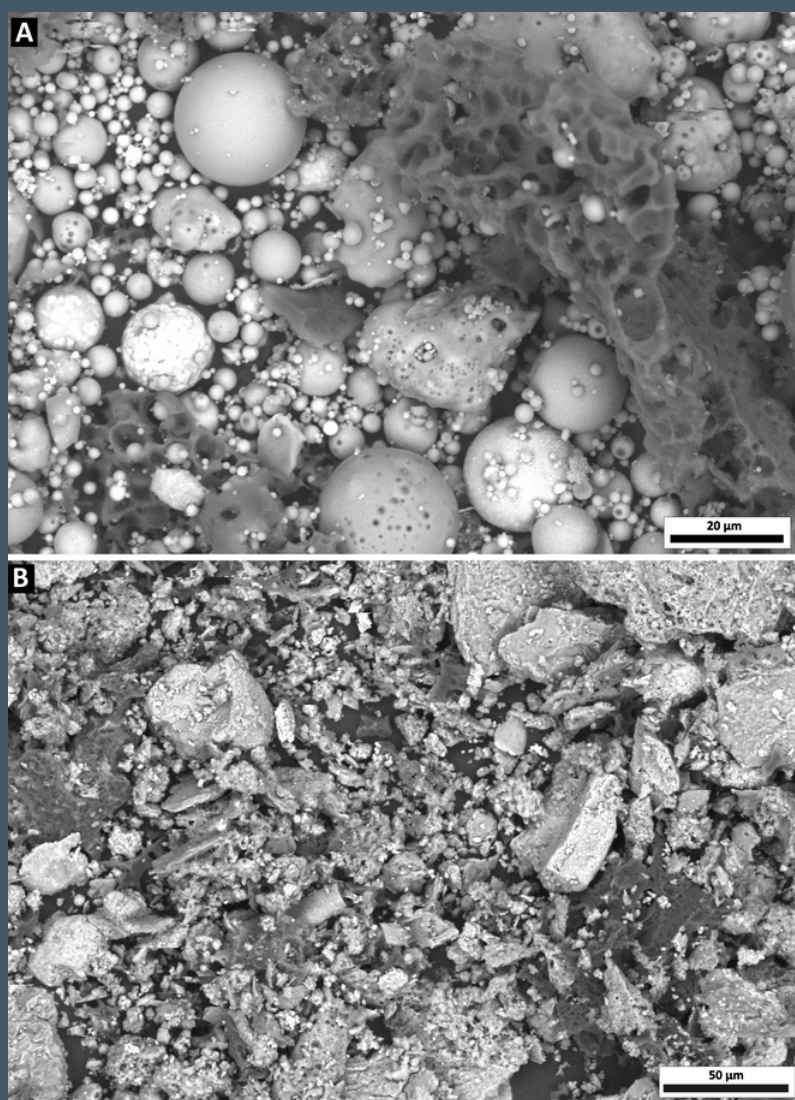
Obecnie zespół pracuje nad wyjaśnieniem mechanizmów stojących za ekstrakcją metali oraz zmianami fazowymi w bioługowanych łupkach, poszukując również optymalnego rozwiązania dla zmaksymalizowania uzysku metali (m.in. poprzez eksperymenty z workami dializowymi).

Opisane badania zostały zrealizowane w ramach projektu [OPUS 25 2023/49/B/ST10/01227](#) („Stability of metallurgical wastes under alternate bioweathering cycles: based on experimental simulations and geochemical model” – Anna Potysz) oraz [The Spackman Award 2022](#) („The influence of variation in maceral composition on microorganism activity in the copper bearing shale” – Mateusz Wolszczak).

Autor tekstu: Mateusz Wolszczak

Badania mineralogiczno-geochemiczne popiołów w kontekście ich stabilności w środowisku glebowym

Produktami ubocznymi spalania węgla w elektrociepłowniach są popiół lotny oraz popiół (żużel) denny. Spalanie węgla wraz z drewnem w domach jednorodzinnych również generuje produkty uboczne, które reprezentowane są przez popiół i sadzę. Popiół i sadza to nie tylko odpady paleniskowe, ale także interesujący materiał do badań mineralogicznych i geochemicznych. Badania w tym zakresie realizowane są przez Artura Pędziwiatra, Łukasza Uzarowicza, Wojciecha Kwasowskiego i Jerzego Jonczaka ze Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie oraz Annę Potysz z Uniwersytetu Wrocławskiego. W badania zaangażowani są również studenci.



Ryc. 1. Obraz mikroskopowy popiołu lotnego z konwencjonalnej (A) oraz fluidalnej (B) technologii spalania węgla (źródło: doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.035).

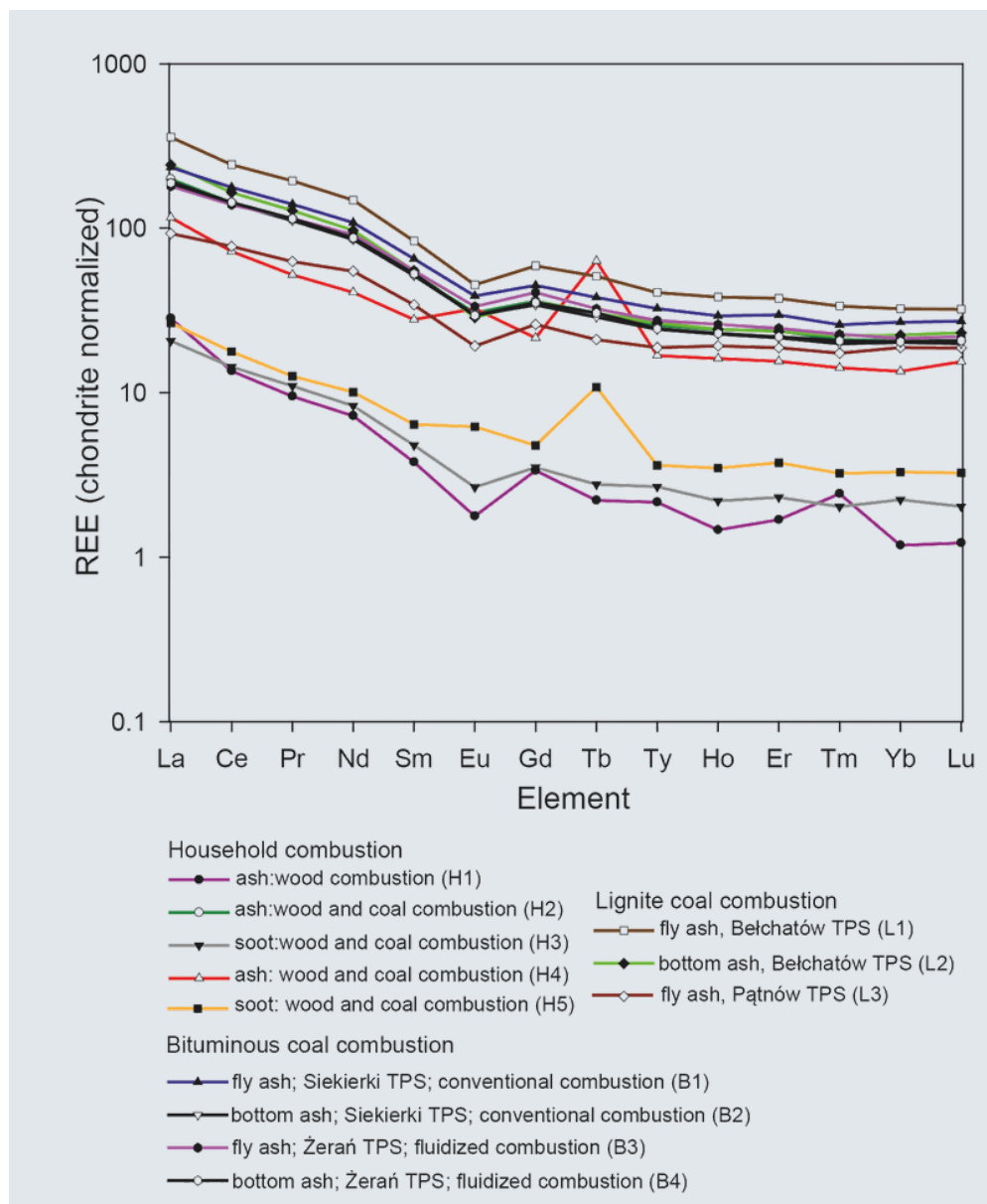
Identyfikacja składu fazowego popiołów jest przydatna w określeniu warunków panujących podczas procesu spalania. Mullit i gehlenit są fazami krystalicznymi, które wskazują na wysokotemperaturowe spalanie węgla w technologii konwencjonalnej (temperatura $\geq 1000^{\circ}\text{C}$). Mullit został m.in. stwierdzony w popiołach po spalaniu węgla kamiennego w elektrociepłowni „Siekierki” (Warszawa), natomiast w popiołach po spalaniu węgla brunatnego (Bełchatów), oprócz mullitu stwierdzono w nich również obecność gehlenitu. Z kolei obie wymienione fazy krystaliczne nie występują w popiołach po spalaniu węgla w złożu fluidalnym, gdzie temperatura spalania jest stosunkowo niska (ok. 800°C). Fazami krystalicznymi po spalaniu węgla w złożu fluidalnym są przykładowo: kalcyt, anhydryt i tlenek wapnia (elektrociepłownia „Żerań”; Warszawa). Kalcyt, anhydryt i tlenek wapnia obecne są również w popiołach z domów jednorodzinnych. Budowa morfologiczna popiołów jest również interesującym aspektem w badaniach mineralogicznych tego typu materiału. Wysokotemperaturowe spalanie węgla w elektrociepłowniach skutkuje pojawieniem się form kulistych popiołów, natomiast w niskotemperaturowym spalaniu węgla kamiennego w technologii fluidalnej i domach jednorodzinnych, form kulistych jest niewiele (Ryc. 1). Wynika to między innymi z faktu, że w wysokich temperaturach dochodzi do przetopienia części domieszek mineralnych z węgla i staje się możliwe wykształcenie form kulistych. Ponadto dynamika przemieszczania się cząstek węgla w procesie spalania jest kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na kształt powstających popiołów.

Temperatura spalania wpływa nie tylko na skład fazowy popiołów, ale również na ich skład chemiczny. Przykładowo w popiołach lotnych więcej jest As, niż w popiołach dennych. Wynika to z faktu, że podczas wysokotemperaturowego spalania, As staje się lotny (punkt wrzenia As wynosi ok. 613°C).



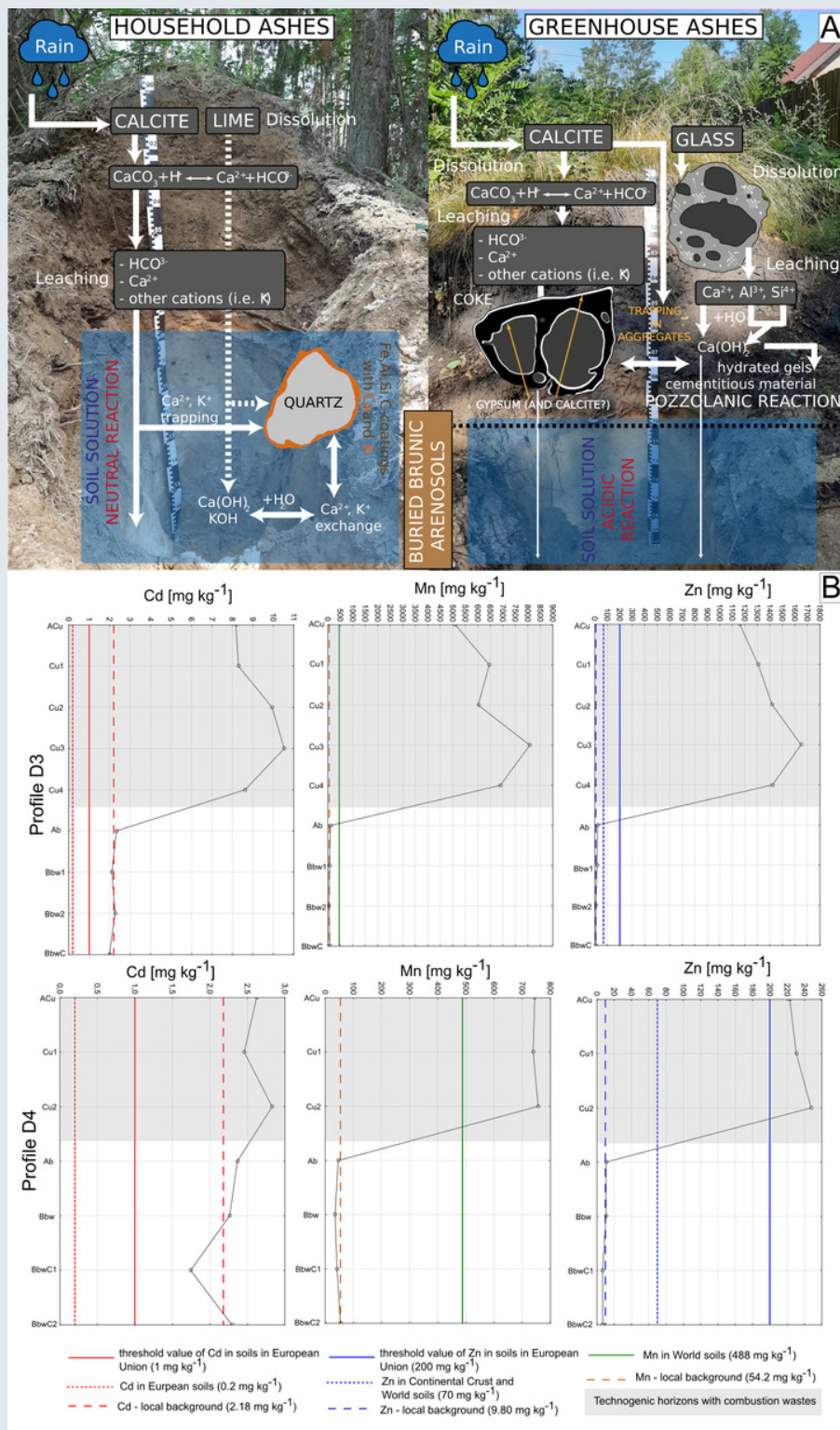
Warto podkreślić, że popioły pochodzące z domów jednorodzinnych stanowią potencjalnie większe zagrożenie środowiskowe niż popioły z elektrociepłowni. W popiołach z palenisk domowych stwierdzono wyższe stężenia metali (np. Cu, Zn) i metaloidów (As, Sb) niż w popiołach z elektrociepłowni. Zależność ta wynika ze współspalania odpadów z węglem i drewnem w gospodarstwach domowych, mimo że praktyka ta jest zabroniona. Przykładowo obecność Sb może wskazywać na spalanie tworzyw sztucznych.

Popioły mogą znaleźć „swoje drugie życie” w procesie produkcji betonu. Obiecujący wydaje się również odzysk pierwiastków ziem rzadkich z popiołów, w których stwierdzono przykładowo dodatnią anomalie Tb (Ryc. 2). Niemniej jednak, część popiołów jest wciąż deponowana w formie hałd, które ostatecznie podlegają remediacji. Remediacja hałd popiołów skutkuje wchodzeniem popiołów w interakcje z korzeniami roślin. Symulowany eksperyment interakcji popiołów lotnych z wydzielinami korzeniowymi wykazał, że skład fazowy popiołów determinuje ich stabilność w środowisku. Popioły lotne uzyskane w technologii konwencjonalnej są bardziej podatne na rozpuszczanie z wydzielinami korzeniowymi, aniżeli popioły lotne z technologii fluidalnej. Eksperyment wykazał, że szkliwo obecne w popiołach z technologii konwencjonalnej łatwiej może ulegać rozpuszczeniu w efekcie interakcji z wydzielinami korzeniowymi w porównaniu do faz występujących w popiołach z technologii fluidalnej.



Ryc. 2. Znormalizowana zawartość pierwiastków ziem rzadkich w popiołach (źródło: doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.035).

Popioły z domów jednorodzinnych nierzadko gromadzone są w postaci pryzm, co nie jest obojętne dla procesów zachodzących w glebach pogrzebanych przez popioły. Opublikowane w 2025 roku badania wykazały, że popioły z domów jednorodzinnych niwelują zakwaszenie pogrzebanych gleb wytworzonych z piasków, natomiast popioły ze spalania węgla celem ogrzewania szklarni, utrzymują kwaśny odczyn gleb piaszczystych.



Ryc. 3. Procesy zachodzące w popiołach z domów jednorodzinnych i szklarni (źródło: doi.org/10.1007/s10653-025-02378-z).

W wyjaśnieniu tej zależności pomogły badania mineralogiczne, które wykazały, że: (a) fragmenty niespalonego węgla/koksu w popiołach ze szklarni charakteryzują się dobrymi właściwościami adsorpcyjnymi (na powierzchni węgla/koksu krystalizują węglany wraz z siarczanami, zapobiegając przemieszczaniu się węglanów do pogrzebanych gleb piaszczystych); (b) węglany wymywane są z popiołów domowych do pogrzebanych gleb piaszczystych oraz (c) otoczki wokół ziaren kwarcu mogą sorbować Ca i K, co sprzyja utrzymaniu odczynu obojętnego w glebach piaszczystych pogrzebanych przez popioły domowe (Ryc. 3). Niemniej jednak, zarówno popioły z domów jednorodzinnych, jak i ze szklarni przyczyniają się do wzrostu ilości pierwiastków metalicznych w pogrzebanych glebach piaszczystych w odniesieniu do lokalnego tła geochemicznego.

Przedstawione badania pokazują, że z sukcesem można łączyć badania mineralogiczne, gleboznawcze, geochemiczne i biologiczne w celu zrozumienia procesów zachodzących w środowisku.

Popioły są wdzięcznym materiałem do takich właśnie badań interdyscyplinarnych.

Więcej informacji na temat opisanych badań dostępnych jest w niżej podanych publikacjach.

Autor: Artur Pędziwiatr

Literatura:

- Pędziwiatr A., Potysz A., Uzarowicz Ł. 2021. Waste Management 131: 136-146. doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.035
- Pędziwiatr A., Potysz A., Kaczmarczyk I., Sulej J., Kwasowski W., Uzarowicz Ł. 2025. Water, Air & Soil Pollution 236: 146. doi.org/10.1007/s11270-025-07755-z
- Pędziwiatr A. 2025. Environmental Geochemistry and Health 47: 68. doi.org/10.1007/s10653-025-02378-z



Konkurs PTMin na najlepsze prace dyplomowe, z zakresu nauk mineralogicznych – Edycja 2025

Polskie Towarzystwo Mineralogiczne ogłasza kolejną edycję corocznego konkursu na najlepsze prace dyplomowe z zakresu nauk mineralogicznych.

Do udziału zapraszamy autorów wyróżniających się prac magisterskich i doktorskich obronionych na polskich uczelniach.

Zakres tematyczny konkursu

Do konkursu można zgłaszać prace obejmujące jeden lub kilka z następujących obszarów badawczych:

- mineralogia,
- geochemia,
- petrologia,
- mineralogia i geochemia stosowana,
- mineralogia i geochemia środowiskowa.

Kto może wziąć udział?

W konkursie oceniane są prace w dwóch kategoriach: (1) praca magisterska, (2) praca doktorska.

Do konkursu można zgłaszać prace, które zostały obronione w ciągu ostatnich dwóch lat przed zgłoszeniem.

Termin zgłoszeń

Zgłoszenia do tegorocznej edycji przyjmujemy do 31 października 2025 roku.

Jak zgłosić pracę?

Pracę dyplomową może zgłosić autor pracy, lub promotor (za zgodą autora). Zgłoszenie należy przesłać drogą elektroniczną na adres: ptmin@ptmin.pl

Rozstrzygnięcie Konkursu nastąpi do 15 grudnia 2025 roku. Laureaci konkursu otrzymają dyplom oraz nagrodę rzeczową, a także propozycję wstąpienia do Polskiego Towarzystwa Mineralogicznego i zwolnienie z opłaty członkowskiej za pierwszy rok.

 Szczegółowy regulamin konkursu oraz wymagane załączniki dostępne są na stronie internetowej Polskiego Towarzystwa Mineralogicznego: www.ptmin.pl

Zachęcamy do udziału w konkursie!

