

POTENCJAŁ ODPADÓW EKSPLOATACYJNYCH I PRZERÓBCZYCH ORAZ FRAKCJI TRUDNOZBYWALNYCH W OZYSKU SUROWCÓW KRYTYCZNYCH W POLSCE - UJĘCIE PRZEGLĄDOWE

THE POTENCIAL OF MINING AND PROCESSING WASTE AS WELL AS HARD-TO-MARKET FRACTIONS, FOR RECOVERING CRITICAL RAW MATERIALS IN POLAND - A REVIEW APPROACH

Makary Musialek, Marcin Maksymowicz, dr Beata Merenda, Maciej Winsche
„Poltegor-Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

DOI:10.5604/01.3001.0055.7661

Streszczenie

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na surowce krytyczne oraz wdrażania założeń Critical Raw Materials Act (CRMA), coraz większego znaczenia nabierają alternatywne źródła ich pozyskiwania. Jednym z nich są odpady eksploatacyjne i przeróbcze, a także frakcje trudnozbywalne powstające w sektorze wydobywczym. W Polsce, ze względu na wieloletnią działalność górnictwa i rozwinięty przemysł surowcowy, zasoby antropogeniczne stanowią istotny, choć nadal niedostatecznie rozpoznany potencjał surowcowy. Celem niniejszego opracowania jest syntetyczne przedstawienie aktualnego stanu wiedzy dotyczącego możliwości odzysku surowców krytycznych z wybranych strumieni materiałów. W pracy omówiono znaczenie badań i rozwoju w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym i bezpieczeństwa surowcowego. Wskazano również na wybrane inicjatywy i projekty badawcze realizowane w tym obszarze, podkreślając ich rolę w rozwoju technologii odzysku i lepszym rozpoznaniu potencjału zasobów antropogenicznych. Artykuł ma charakter przeglądowy i edukacyjny, stanowiąc próbę uporządkowania pojęć oraz wskazania kierunków dalszych działań w zakresie wykorzystania odpadów jako wtórnego źródła surowców krytycznych w Polsce.

Słowa kluczowe: Akt o Surowcach Krytycznych (CRMA), zasoby antropogeniczne, surowce krytyczne, odpady górnicze, odpady przeróbcze, gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ), potencjał surowcowy

Summary

In the context of the growing demand for critical raw materials and the implementation of the assumptions of the Critical Raw Materials Act (CRMA), alternative sources of their supply are gaining increasing importance. One such source comprises mining and processing waste, as well as hard-to-market fractions generated within the extractive sector. In Poland, due to its long-standing mining activity and well-developed raw materials industry, anthropogenic resources constitute a significant, yet still insufficiently recognized resource potential. The aim of this study is to provide a synthetic overview of the current state of knowledge regarding the recovery potential of critical raw materials from selected material streams. The paper discusses the role of research and development in the context of the circular economy and raw materials security. It also highlights selected initiatives and research projects undertaken in this field, emphasizing their contribution to the advancement of recovery technologies and to a better assessment of the potential of anthropogenic resources. The article is of a review and educational nature, aiming to systematize key concepts and to indicate directions for further activities in the utilization of waste as a secondary source of critical raw materials in Poland.

Keywords: Critical Raw Materials Act (CRMA), anthropogenic resources, critical raw materials, mining waste, mineral processing waste, circular economy (CE), resource potential

Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny wzrost zapotrzebowania na surowce krytyczne (ang. critical raw materials, CRM), wynikający przede wszystkim z transformacji energetycznej, rozwoju technologii niskoemisyjnych oraz postępującej cyfryzacji gospodarki. Surowce te odgrywają kluczową rolę w produkcji nowoczesnych technologii, takich jak baterie, pojazdy elektryczne czy instalacje OZE, a prognozy wskazują na ich gwałtownie rosnące zapotrzebowanie w nadchodzących dekadach (Jones et al., 2020); (Melcher & Dunkel, 2025). Szczególnie wysoki wzrost przewidywany jest dla metali wykorzystywanych w sektorze bateryjnym, takich jak lit i kobalt, których zapotrzebowanie może wzrosnąć wielokrotnie w związku z rozwojem elektromobilności (Fu et al., 2020).

Wzrost znaczenia surowców krytycznych wiąże się jednocześnie z rosnącymi obawami dotyczącymi bezpieczeństwa ich dostaw. Produkcja wielu z nich jest silnie skoncentrowana geograficznie, a ich wydobycie i przetwarzanie obciążone są ryzykiem geopolitycznym, środowiskowym i ekonomicznym (Kerr, 2023). W odpowiedzi na te wyzwania gospodarcze, Unia Europejska i kraje członkowskie wdrażają strategie mające na celu zwiększenie bezpieczeństwa surowcowego poprzez dywersyfikację dostaw, rozwój krajowych źródeł oraz intensyfikację działań w zakresie recyklingu i odzysku surowców.

Jednym z kluczowych kierunków działań w tym obszarze jest rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), która zakłada maksymalizację wykorzystania zasobów poprzez ich ponowne użycie, recykling oraz odzysk z odpadów. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabierają wtórne źródła surowców, w tym odpady przemysłowe, komunalne oraz górnicze, które mogą stanowić istotne uzupełnienie podaży surowców pierwotnych. Liczne badania wskazują, że odpady te mogą zawierać znaczące ilości surowców krytycznych, a ich zagospodarowanie może przyczynić się zarówno do zwiększenia bezpieczeństwa surowcowego, jak i ograniczenia presji środowiskowej i społecznej związanej z nowymi inwestycjami górniczymi (Kurşunoğlu, 2025); (Chowdhury & Talan, 2025).

Szczególnie istotnym źródłem wtórnym są odpady górnicze i przerobcze, w tym osady poflotacyjne, które coraz częściej postrzegane są jako potencjalne „złoża wtórne”. Badania wskazują, że materiały te mogą stanowić realne źródło metali krytycznych, a ich ponowne przetwarzanie może być uzasadnione zarówno środowiskowo, jak i ekonomicznie, choć pozostaje silnie zależne od dostępności i rozwoju technologii oraz uwarunkowań rynkowych (Araya et al., 2021); (Kurşunoğlu, 2025).

W Polsce, ze względu na wieloletnią historię eksploatacji surowców mineralnych oraz rozwinięty sektor górniczy, zgromadzono znaczne ilości odpadów eksploatacyjnych i przerobczych, które mogą stanowić istotny element tzw. zasobów antropogenicznych. Materiały te obejmują zarówno historyczne, jak i współczesne nagromadzenia odpadów, których potencjał surowcowy pozostaje w dużej mierze niedostatecznie rozpoznany. Jednocześnie doświadczenia międzynarodowe wskazują, że zasoby tego typu mogą stanowić ważny komponent przyszłych łańcuchów dostaw surowców krytycznych (Britt & Czarnota, 2024).

W literaturze oraz praktyce geologiczno-górnicznej coraz częściej podkreśla się, że historyczne i współczesne nagromadzenia odpadów wydobywczych oraz przerobczych mogą być traktowane jako tzw. złoża antropogeniczne. Pojęcie to odnosi się do antropogenicznych koncentracji surowców mineralnych powstałych w wyniku działalności człowieka, które potencjalnie mogą stanowić przedmiot przyszłego wykorzystania gospodarczego. Współczesne podejście do złóż antropogenicznych wykracza poza tradycyjne postrzeganie odpadów jako obciążenia środowiskowego, wskazując na ich znaczenie jako wtórnych zasobów surowcowych wpisujących się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz polityki bezpieczeństwa surowcowego (Stefanowicz, 2025).

Jak wskazuje Stefanowicz (2025), rozwój koncepcji złóż antropogenicznych związany jest zarówno z postępowaniem technologicznym umożliwiającym odzysk surowców z materiałów odpadowych, jak i ze zmianami regulacyjnymi oraz wzrostem znaczenia surowców krytycznych w gospodarce europejskiej. Autor podkreśla również, że właściwa identyfikacja, dokumentowanie i klasyfikacja tego typu zasobów stają się istotnym elementem nowoczesnej polityki surowcowej, szczególnie w krajach o długiej historii działalności górniczej, takich jak Polska.

Pomimo rosnącego zainteresowania problematyką odzysku surowców z odpadów, zagadnienie to w warunkach krajowych nadal wymaga pogłębionych analiz, szczególnie w zakresie identyfikacji potencjalnych źródeł CRM, oceny ich dostępności oraz możliwości technologicznego i ekonomicznego wykorzystania.

Celem niniejszej pracy jest przegląd i syntetyczna ocena potencjału odpadów eksploatacyjnych, odpadów przerobczych oraz frakcji trudnozbywalnych jako wtórnych źródeł surowców krytycznych w Polsce. W pracy dokonano identyfikacji głównych strumieni materiałowych, wskazano potencjalne kierunki odzysku wybranych pierwiastków oraz omówiono kluczowe uwarunkowania związane z ich wykorzystaniem, w tym aspekty technologiczne, ekonomiczne i środowiskowe.

Ramy koncepcyjne i istotne definicje

W kontekście rosnącego znaczenia surowców krytycznych oraz poszukiwania alternatywnych źródeł ich pozyskiwania, kluczowe znaczenie ma jednoznaczne uporządkowanie podstawowych pojęć. Szczególnie istotne są definicje surowców krytycznych, zasobów antropogenicznych oraz koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym.

Surowce krytyczne – definicja i kryteria

Termin „surowce krytyczne” (ang. critical raw materials, CRM) odnosi się do grupy surowców mineralnych o szczególnym znaczeniu gospodarczym, których dostawy obciążone są wysokim ryzykiem zakłóceń. W podejściu Unii Europejskiej krytyczność surowców oceniana jest przede wszystkim na podstawie dwóch kryteriów: znaczenia gospodarczego oraz ryzyka podaży, wynikającego m.in. z geograficznej koncentracji produkcji, ograniczonej możliwości substytucji oraz niskiego poziomu recyklingu (European Commission, 2023); (Tkaczyk et al., 2018).

Surowce te pełnią kluczową rolę w strategicznych sektorach gospodarki, takich jak transformacja energetyczna, przemysł cyfrowy, elektromobilność czy technologie niskoemisyjne, a ich dostępność stanowi jeden z podstawowych warunków stabilnego rozwoju gospodarczego (Kerr, 2023).

CRMA jako aktualna podstawa definicyjna w Europie

Obecnie podstawowym punktem odniesienia dla identyfikacji surowców krytycznych w Unii Europejskiej jest rozporządzenie Critical Raw Materials Act, które weszło w życie w 2024 roku. Akt ten wprowadza jednolite ramy oceny oraz zarządzania surowcami krytycznymi w skali UE, obejmując cały łańcuch wartości – od wydobycia, przez przetwarzanie, po recykling (European Union, 2024).

CRMA nie tylko definiuje wykaz surowców krytycznych, ale również ustanawia cele strategiczne związane z bezpieczeństwem dostaw, w tym zwiększenie udziału wydobycia, przetwarzania i recyklingu surowców w obrębie Unii Europejskiej oraz ograniczenie zależności od importu z pojedynczych kierunków (European Union, 2024).

Wykaz surowców krytycznych (CRMA 2024)

Zgodnie z załącznikiem II do rozporządzenia Critical Raw Materials Act, wykaz surowców krytycznych obejmuje następujące surowce: antymon, arsen, boksyt/tlenek glinu/aluminium, baryt, beryl, bizmut, bor, kobalt, węgiel kokсовy, miedź, skałen, fluoryt, gal, german, hafn, hel, metale ciężkie ziem rzadkich, metale lekkie ziem rzadkich, lit, magnez, mangan, grafit, nikiel, niob, fosforyt, fosfor, platynowce, skand, krzem metaliczny, stront, tantal, tytan metaliczny, wolfram oraz wanad (European Union, 2024).

Lista ta ma charakter dynamiczny i podlega okresowej aktualizacji, odzwierciedlając zmieniające się uwarunkowania technologiczne, gospodarcze oraz geopolityczne (European Commission, 2023).

Według autorów niniejszej publikacji, uwzględnienie w wykazie surowców takich jak skałen wskazuje na rozszerzenie podejścia Unii Europejskiej, które obejmuje nie tylko metale wykorzystywane w zaawansowanych technologiach, lecz również surowce powszechnie stosowane w przemyśle, jeśli ich znaczenie gospodarcze oraz ryzyko podaży uzasadniają ich klasyfikację jako krytycznych.

Zasoby antropogeniczne

Równolegle do pojęcia surowców krytycznych rozwija się koncepcja zasobów antropogenicznych, rozumianych jako nagromadzenia materiałów powstałych w wyniku działalności człowieka, które mogą stanowić potencjalne źródło surowców mineralnych (Krook et al., 2012); (Binnemans et al., 2013).

Z perspektywy branży górniczej i branż powiązanych, do zasobów tych zalicza się m.in.:

- odpady wydobywcze,
- odpady przerobcze,
- składowiska odpadów przemysłowych,
- produkty uboczne procesów technologicznych,
- wtórne strumienie materiałowe.

Zasoby antropogeniczne mogą być traktowane jako forma „złóż wtórnych”, których wykorzystanie wpisuje się w ideę

racjonalnego gospodarowania zasobami oraz ograniczania presji na środowisko (Cossu & Williams, 2015). Ich charakterystyka jest jednak bardziej złożona niż w przypadku złóż naturalnych, co wynika z dużej zmienności składu oraz zróżnicowanej genezy materiałów.

Gospodarka o obiegu zamkniętym

Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ, ang. circular economy) stanowi model gospodarowania zasobami, którego celem jest maksymalne wydłużenie cyklu życia materiałów i produktów poprzez ich ponowne wykorzystanie, naprawę, recykling oraz odzysk (Geissdoerfer et al., 2017).

W przeciwieństwie do tradycyjnego modelu GOZ zakłada minimalizację powstawania odpadów oraz utrzymanie wartości surowców w gospodarce przez możliwie najdłuższy czas (European Commission, 2020).

W ujęciu systemowym gospodarka o obiegu zamkniętym obejmuje działania na wszystkich etapach cyklu życia produktu - od projektowania, przez produkcję i użytkowanie, aż po zagospodarowanie odpadów - z naciskiem na efektywność materiałową oraz ograniczenie zużycia surowców pierwotnych (Geissdoerfer et al., 2017).

Zgodnie z podejściem Unii Europejskiej, gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi jeden z kluczowych elementów strategii zrównoważonego rozwoju oraz bezpieczeństwa surowcowego, w tym w kontekście Critical Raw Materials Act, który podkreśla znaczenie odzysku surowców z odpadów oraz zwiększenia udziału surowców wtórnych w gospodarce.

Źródła zasobów antropogenicznych związanych z działalnością górniczą w Polsce

Zasoby antropogeniczne związane z działalnością górniczą i przeróbczą stanowią istotny element krajowej bazy surowcowej Polski, będący efektem wieloletniej eksploatacji kopalni oraz rozwoju przemysłu wydobywczego i przetwórczego. Jak wskazują dane PIG-PIB, w Polsce wytwarzane są znaczne ilości odpadów wydobywczych i przerobczych, które gromadzone są zarówno w postaci składowisk, jak i w formie bieżących strumieni materiałowych (PIG-PIB, 2023; 2024). Materiały te, choć tradycyjnie klasyfikowane jako odpady, coraz częściej postrzegane są jako potencjalne wtórne źródła surowców mineralnych, w tym również surowców krytycznych (Binnemans et al., 2013); (Krook et al., 2012).

Odpady wydobywcze definiuje się jako odpady powstające przy poszukiwaniu, wydobywaniu, fizycznej i chemicznej przeróbce rud oraz innych kopalni. Stanowią one ponad 50% wszystkich odpadów wytwarzanych w kraju (www.pgi.gov.pl).

Odpady eksploatacyjne

Do podstawowych kategorii zasobów antropogenicznych w Polsce należą odpady eksploatacyjne, obejmujące nadkład oraz skały płonne powstające w trakcie udostępniania i eksploatacji złóż.

Według PIG-PIB, odpady eksploatacyjne to skały pochodzące z robót górniczych i przygotowawczych udostępniających złoża kopaliny głównej w kopalniach głębinowych lub odkrywkowych. Odpady te stanowią

średnio ok. 20% ogólnej masy odpadów wydobywczych (www.pgi.gov.pl).

Materiały te charakteryzują się dużą objętością oraz zazwyczaj niską zawartością składników użytecznych, jednak mogą zawierać pierwiastki towarzyszące, których potencjał pozostaje w dużej mierze nierozpoznany (Lottermoser, 2010). Odpady tego typu są szczególnie licznie reprezentowane w regionach o intensywnej działalności górniczej w Polsce, takich jak:

- Górnoląskie Zagłębie Węglowe (GZW),
- Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM),
- rejon eksploatacji węgla brunatnego (Konin, Turów, Bełchatów).

Ze względu na bardzo duże wolumeny materiału, nawet niskie koncentracje pierwiastków mogą mieć znaczenie w kontekście potencjalnego odzysku.

Odpady przeróbcze

Drugą istotną grupę stanowią odpady przeróbcze powstające w procesach wzbogacania kopalin, w szczególności osady poflotacyjne. Według PIG-PIB, odpady przeróbcze to materiał skalny wydobyty wraz z urobkiem i oddzielany w procesach wzbogacania kopalin głównej (np. w trakcie sortowania, rozdrabniania, płukania, flotacji). Ich udział w ogólnej masie wytwarzanych odpadów wydobywczych wynosi blisko 80% (www.pgi.gov.pl).

Materiały te powstają w wyniku procesów flotacyjnych oraz mechanicznego przetwarzania kopalin i charakteryzują się drobnoziarnistą strukturą oraz stosunkowo jednorodnym składem. W literaturze wskazuje się, że osady poflotacyjne należą do najbardziej perspektywicznych źródeł wtórnych surowców, ponieważ mogą zawierać istotne ilości pierwiastków, które nie zostały odzyskane w procesach pierwotnych (Kurşunoğlu, 2025).

W warunkach polskich szczególne znaczenie mają osady związane z przeróbką rud miedzi w LGOM, które mogą zawierać pierwiastki towarzyszące, w tym metale krytyczne i strategiczne. W wielu przypadkach ich potencjał nie był dotychczas w pełni wykorzystywany, co wynika zarówno z ograniczeń technologicznych, jak i uwarunkowań ekonomicznych.

Odpady sektora surowców skalnych

Istotnym, choć często niedocenianym źródłem zasobów antropogenicznych jest sektor surowców skalnych, obejmujący eksploatację kruszyw naturalnych, surowców wapienniczych, dolomitów, granitów i bazaltów.

W wyniku działalności kamieniołomów oraz zakładów przeróbczych powstają znaczne ilości:

- nadkładu,
- skał płonnych,
- drobnych frakcji mineralnych.

Materiały te często nie znajdują pełnego zagospodarowania, mimo że ich wolumen jest bardzo duży. W literaturze podkreśla się, że nawet materiały o niskiej zawartości pierwiastków mogą stanowić istotne źródło surowców w ujęciu masowym (Blengini et al., 2017).

Szczególne znaczenie ma fakt, że w świetle Critical Raw Materials Act do surowców krytycznych zaliczono również

skalanie, co wskazuje na rosnące znaczenie sektora surowców skalnych w kontekście bezpieczeństwa surowcowego.

Ponadto, zasadne wydaje się być na wskazanie na frakcje trudnozbywalne, niebędące formalnie odpadami, a obejmujące materiały o ograniczonej wartości rynkowej lub trudne do zagospodarowania w obecnych warunkach technologicznych i ekonomicznych.

Do grupy tej zalicza się m.in.:

- drobne frakcje mineralne,
- produkty uboczne o zmiennej jakości,
- materiały bez stabilnych rynków zbytu.

Pomimo niskiej wartości handlowej, frakcje te mogą stanowić źródło pierwiastków śladowych i towarzyszących, których znaczenie rośnie wraz z rozwojem technologii odzysku oraz wzrostem cen surowców (Cossu & Williams, 2015).

Skala i rozmieszczenie zasobów

Zasoby antropogeniczne w Polsce charakteryzują się znaczną skalą nagromadzenia oraz dużym zróżnicowaniem przestrzennym. Największe koncentracje związane są z regionami o długiej historii eksploatacji surowców, w szczególności GZW, LGOM oraz obszarami eksploatacji węgla brunatnego. Zgodnie z danymi PIG-PIB, skala zgromadzonych odpadów wydobywczych w Polsce liczona jest w setkach milionów ton, co wskazuje na znaczący potencjał surowcowy tych materiałów (PIG-PIB, 2023).

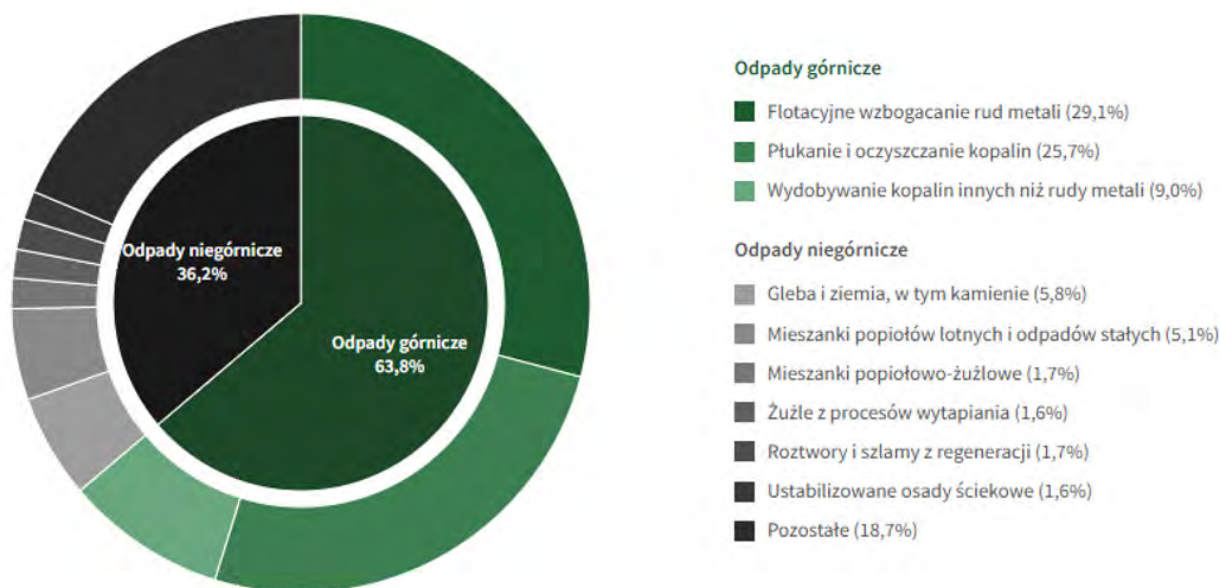
W Polsce zasoby antropogeniczne związane z działalnością przemysłową osiągają bardzo dużą skalę, co wynika bezpośrednio z wieloletniej eksploatacji surowców mineralnych oraz rozwiniętego sektora energetycznego i przetwórczego. Zgodnie z danymi GUS, w 2024 roku wytworzono ok. 117 mln ton odpadów, z czego jedynie ok. 12% stanowiły odpady komunalne, a zdecydowaną większość - odpady przemysłowe (Rys. 1). Kluczowym elementem tej struktury są odpady związane z sektorem wydobywczym (GUS, 2025).

Dodatkowo, istotnym aspektem charakteryzującym krajowe zasoby antropogeniczne jest ich wyraźne zróżnicowanie przestrzenne, które odzwierciedla strukturę przemysłową poszczególnych regionów. Zgodnie z danymi GUS zawartymi w raporcie Ochrona środowiska 2025, największe ilości odpadów (z wyłączeniem odpadów komunalnych) wytwarzane są w województwach o silnie rozwiniętym przemyśle wydobywczym, energetycznym i ciężkim. Do regionów o najwyższej masie wytwarzanych odpadów należą przede wszystkim:

- województwo dolnośląskie,
- województwo śląskie,
- województwo łódzkie.

Województwo dolnośląskie charakteryzuje się wysokim udziałem odpadów związanych z górnictwem rud metali, w szczególności w rejonie LGOM. Z kolei województwo śląskie dominuje pod względem ilości wytwarzanych odpadów przemysłowych, co związane jest z koncentracją górnictwa węgla kamiennego oraz przemysłu ciężkiego. Istotne znaczenie mają również regiony związane z eksploatacją węgla brunatnego i energetyką konwencjonalną, takie jak województwo łódzkie (Bełchatów) (GUS, 2025).

Rozkład przestrzenny odpadów wskazuje jednoznacznie, że zasoby antropogeniczne w Polsce mają charakter silnie



Rys. 1. Procentowy udział odpadów, z wyłączeniem odpadów komunalnych, wytworzony według rodzajów w 2024 (na podstawie: GUS, 2025).

Fig. 1. Percentage share of waste, excluding municipal waste, generated by type in 2024 (based on: GUS, 2025).

skoncentrowany regionalnie, co ma istotne znaczenie dla potencjalnego zagospodarowania tych materiałów. Lokalizacja dużych wolumenów odpadów w bezpośrednim sąsiedztwie istniejącej infrastruktury przemysłowej może stanowić czynnik sprzyjający ich przyszłemu wykorzystaniu jako wtórnych źródeł surowców krytycznych.

Ograniczenia wykorzystania zasobów

Pomimo dużej skali zasobów antropogenicznych, ich wykorzystanie jako wtórnego źródła surowców w Polsce pozostaje ograniczone. Główne bariery obejmują:

- niedostateczne rozpoznanie składu materiałów,
- brak kompleksowych baz danych,
- ograniczenia technologiczne,
- uwarunkowania ekonomiczne.

W literaturze podkreśla się, że to właśnie czynniki technologiczne i ekonomiczne, a nie dostępność materiału, stanowią główne ograniczenie wykorzystania zasobów antropogenicznych (Araya et al., 2021).

Potencjał odzysku surowców krytycznych ze źródeł antropogenicznych

Zasoby antropogeniczne powstające w wyniku działalności górniczej, przeróbczej i energetycznej stanowią zróżnicowane, lecz potencjalnie istotne źródło surowców krytycznych (CRM) oraz strategicznych (SRM). Ich znaczenie systematycznie rośnie w kontekście transformacji energetycznej i technologicznej oraz potrzeby zwiększenia bezpieczeństwa surowcowego. W literaturze podkreśla się, że materiały odpadowe mogą stanowić realne uzupełnienie podaży surowców pierwotnych, szczególnie w warunkach ograniczonej dostępności złóż naturalnych (Binnemans et al., 2013).

Zakres możliwego odzysku pozostaje ściśle powiązany z charakterem materiału odpadowego, jego genezą oraz właściwościami fizykochemicznymi, co przekłada się na

zróżnicowany potencjał (Rys. 2) poszczególnych strumieni (Lottermoser, 2010).

Odpady eksploatacyjne

Odpady eksploatacyjne, obejmujące nadkład i skały płonne, mogą zawierać pierwiastki takie jak wanad (V), tytan (Ti), magnez (Mg), skand (Sc) oraz pierwiastki ziem rzadkich (REE). Ich koncentracje są jednak zazwyczaj niskie, a występowanie rozproszone, co ogranicza bezpośrednią opłacalność odzysku (Lottermoser, 2010).

Jednocześnie bardzo duże wolumeny tych materiałów sprawiają, że mogą one stanowić potencjalne źródło wtórne w dłuższej perspektywie, szczególnie w kontekście rozwoju technologii niskoprocentowego odzysku oraz zmian uwarunkowań rynkowych (Blengini et al., 2017).

Odpady przeróbcze i osady poflotacyjne

Znacznie wyższy potencjał przypisuje się odpadom przeróbczym, w szczególności osadom poflotacyjnym, które należą do najważniejszych grup materiałów pod względem możliwości odzysku CRM i SRM.

Badania wskazują, że materiały te mogą zawierać m.in. kobalt (Co), nikiel (Ni), wanad (V), antymon (Sb), pierwiastki ziem rzadkich (REE) oraz metale z grupy platynowców (PGM), które nie zostały odzyskane w procesach pierwotnych (Kurşunoğlu, 2025).

Potencjał tych materiałów oceniany jest jako umiarkowany do wysokiego, przy czym jego wykorzystanie zależy od dostępności odpowiednich technologii oraz uwarunkowań ekonomicznych (Araya et al., 2021).

Odpady energetyczne

Istotną rolę odgrywają również odpady energetyczne, takie jak popioły lotne i żużle, które stanowią potencjalne źródło pierwiastków technologicznych, w tym galu (Ga),

germanu (Ge), skandu (Sc), wanadu (V) oraz pierwiastków ziem rzadkich (REE).

W wielu przypadkach pierwiastki te występują w formach sprzyjających odzyskowi, a popioły lotne uznawane są za jedno z bardziej perspektywicznych wtórnych źródeł REE (Blissett & Rowson, 2012).

Odpady sektora surowców skalnych

Odpady i frakcje pochodzące z sektora surowców skalnych, obejmujące drobne frakcje, odsiewy i odpady z przeróbki mechanicznej, charakteryzują się relatywnie niską zawartością pierwiastków takich jak Ti, Sc, Mg oraz REE. Mimo bardzo niskich koncentracji, ich znaczenie wynika z dużych wolumenów materiału, które mogą generować istotny potencjał surowcowy w ujęciu długoterminowym (Blengini et al., 2017).

Potencjał zagospodarowania odpadów sektora surowców skalnych dotyczy również odzysku minerałów skaleniowych obecnych w drobnych frakcjach oraz produktach ubocznych przeróbki mechanicznej skał. Badania mineralogiczne i chemiczne wskazują, że racjonalna gospodarka złożem oraz dokładna charakterystyka petrograficzna mogą umożliwić efektywniejsze wykorzystanie kopalin towarzyszących, w tym minerałów skaleniowych wykorzystywanych w przemyśle ceramicznym i szklarskim (Kania et al., 2021).

Odpady hutnicze

Szczególną grupę stanowią odpady hutnicze, które często cechują się podwyższonymi koncentracjami pierwiastków krytycznych, takich jak Sb, V, Ti, Nb, Ta, REE oraz metale z grupy platynowców (PGM). Ze względu na wcześniejsze procesy koncentracji metali materiały te należą do najbardziej perspektywicznych wtórnych źródeł CRM i SRM, a ich odzysk jest przedmiotem intensywnych badań (Binnemans et al., 2013).

Uwarunkowania odzysku

Niezależnie od rodzaju materiału, potencjał odzysku surowców krytycznych z zasobów antropogenicznych ma charakter warunkowy i nie jest determinowany wyłącznie ich zawartością.

Kluczowe znaczenie mają:

- forma występowania pierwiastków,
- dostępność technologii odzysku,
- uwarunkowania ekonomiczne,
- regulacje prawne i środowiskowe (Araya et al., 2021); (Kurşunoğlu, 2025).

W wielu przypadkach ograniczeniem pozostaje nie brak zasobów, lecz brak efektywnych i opłacalnych metod ich wykorzystania, co wskazuje na kluczową rolę badań i rozwoju technologii w tym obszarze.

Inicjatywy badawczo-rozwojowe

Projekty badawcze w Polsce i UE

W ostatnich latach w Europie obserwuje się wyraźną intensyfikację działań badawczo-rozwojowych

ukierunkowanych na odzysk surowców krytycznych z zasobów antropogenicznych. Szczególną rolę odgrywają projekty finansowane w ramach programów europejskich takich jak Horizon 2020, Horizon Europe, EIT Raw Materials oraz Research Fund for Coal and Steel (RFCS), które koncentrują się bezpośrednio na sektorze górnictwem i materiałach odpadowych oraz krajowych finansowanych np. przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR).

Istotne znaczenie mają projekty RFCS, wśród których szczególnie wyróżnia się WASTE2CRM, ukierunkowany na odzysk surowców krytycznych z odpadów wydobywczych i przerobczych. Projekt ten koncentruje się na identyfikacji potencjału surowcowego odpadów górniczych, opracowaniu metod ich charakterystyki oraz rozwoju technologii odzysku pierwiastków o znaczeniu krytycznym. WASTE2CRM wpisuje się bezpośrednio w podejście gospodarki o obiegu zamkniętym, traktując odpady jako wtórne źródło surowców oraz element bezpieczeństwa surowcowego UE (www.waste2crm.itpe.pl).

Do projektów RFCS należy również zaliczyć inicjatywy skoncentrowane na zagospodarowaniu odpadów pogórnictwa i hutniczych oraz ograniczaniu ich oddziaływania środowiskowego przy jednoczesnym odzysku wartościowych pierwiastków. Projekty te mają szczególne znaczenie dla krajów o rozwiniętym sektorze górnictwem, takich jak Polska, gdzie występują znaczne nagromadzenia zasobów antropogenicznych.

Równolegle realizowane są projekty w ramach programów Horizon 2020 i Horizon Europe, które rozwijają innowacyjne technologie odzysku i nowe łańcuchy wartości. Przykładem jest projekt NEMO, którego celem jest opracowanie technologii niemal bezodpadowego przetwarzania niskogatunkowych odpadów siarczkowych oraz odzysku metali i surowców krytycznych z tailings (Hubau et al., 2020).

W obszarze odpadów górniczych i ich charakterystyki istotną rolę odgrywał projekt INCO-Piles 2020, który koncentruje się na opracowaniu metod oceny potencjału surowcowego odpadów oraz promocji dobrych praktyk i transferu technologii (Guatame-García et al., 2021).

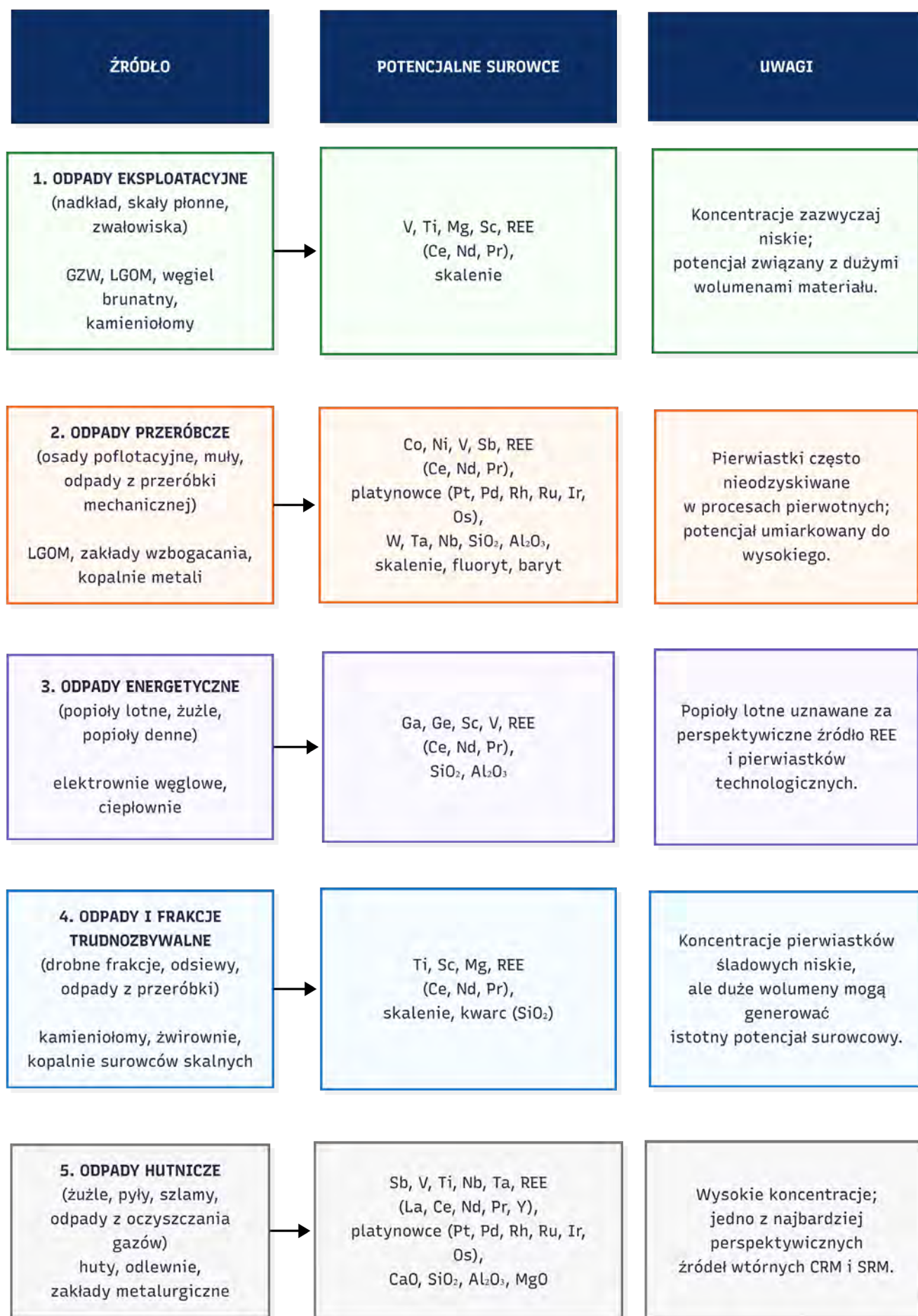
W kontekście pierwiastków ziem rzadkich szczególnie znaczenie ma projekt ENVIREE, który badał możliwości odzysku REE z odpadów górniczych oraz analizuje wpływ procesów odzysku na środowisko (Kossakowska & Grzesik, 2019).

Z kolei projekt SULTAN koncentrował się na jednoczesnej remediacji środowiskowej oraz odzysku surowców z odpadów siarczkowych, integrując podejście środowiskowe i surowcowe (www.etn-sultan.eu).

W obszarze odzysku metali o wysokiej wartości technologicznej realizowany był projekt PLATIRUS, który rozwijał zaawansowane metody odzysku metali z grupy platynowców z odpadów przemysłowych i zużytych produktów (www.sintef.no/en).

Uzupełnieniem tych działań są inicjatywy geologiczne, takie jak projekty GeoERA (FRAME, MINDeSEA), które dostarczają danych o rozmieszczeniu i potencjale surowców krytycznych w Europie (www.geoera.eu/projects).

W Polsce działania badawcze koncentrują się m.in. na odzysku surowców z odpadów przemysłowych i komunalnych, czego przykładem jest projekt PolFerAsh, dotyczący odzysku fosforu z popiołów ściekowych. Badania te wskazują



Rys. 2. Wybrane źródła i potencjalne surowce możliwe do odzysku z odpadów (opracowanie ze, wsparciem AI).
 Fig. 2. Selected sources and recovery potential raw materials with from waste (authors work, AI-assisted).

na rosnące znaczenie technologii odzysku w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym oraz bezpieczeństwa surowcowego (Smol et al., 2023).

Rola badań i rozwoju (R&D)

Działania badawczo-rozwojowe odgrywają kluczową rolę w rozwoju technologii odzysku surowców krytycznych z zasobów antropogenicznych. W szczególności koncentrują się one na opracowaniu nowych metod przetwarzania materiałów o złożonym składzie, takich jak odpady poflotacyjne, popioły czy odpady hutnicze. Jednym z głównych wyzwań pozostaje efektywność technologiczna oraz energochłonność procesów odzysku, co ma istotny wpływ na ich oddziaływanie środowiskowe i opłacalność.

Równocześnie rozwijane są narzędzia wspierające rozpoznanie zasobów antropogenicznych, w tym bazy danych oraz modele oceny potencjału surowcowego, które umożliwiają bardziej efektywne planowanie działań związanych z ich zagospodarowaniem.

Znaczenie współpracy nauka-przemysł

Efektywne wykorzystanie zasobów antropogenicznych wymaga ścisłej współpracy pomiędzy sektorem naukowym a przemysłem. Projekty europejskie często zakładają tworzenie konsorcjów obejmujących uczelnie, instytuty badawcze oraz przedsiębiorstwa, co umożliwia transfer wiedzy i przyspiesza wdrażanie nowych technologii. Współpraca ta ma kluczowe znaczenie dla przejścia od etapu badań laboratoryjnych do wdrożeń przemysłowych, które są niezbędne dla realnego wykorzystania potencjału surowców wtórnych. Jednocześnie rozwój innowacyjnych łańcuchów wartości dla surowców krytycznych wymaga integracji działań w całym cyklu życia materiału – od identyfikacji zasobów, przez technologie odzysku, aż po ich ponowne wykorzystanie w gospodarce.

Podsumowanie i dyskusja

Przeprowadzony przegląd oraz analiza krajowych uwarunkowań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków i tez dyskusyjnych.

1. Zasoby antropogeniczne stanowią istotny, lecz nadal niedostatecznie wykorzystany element krajowej bazy surowcowej. Polska, ze względu na wieloletnią działalność górnictwa dysponuje znaczącymi nagromadzeniami odpadów eksploatacyjnych i przeróbczych. Jednocześnie ich potencjał w kontekście surowców krytycznych pozostaje w dużej mierze nierozpoznany.

2. Kluczowym problemem jest rozbieżność pomiędzy potencjałem teoretycznym a możliwością jego wykorzystania. Obecność pierwiastków krytycznych w materiałach odpadowych nie jest równoznaczna z możliwością ich efektywnego odzysku. W wielu przypadkach koncentracje są niższe niż w złożach pierwotnych, a ich forma występowania wymaga zastosowania zaawansowanych technologii, co istotnie ogranicza opłacalność procesów.

3. Najwyższy potencjał odzysku wykazują odpady przeróbcze, w szczególności osady poflotacyjne. Materiały te charakteryzują się wyższą zawartością pierwiastków oraz większą jednorodnością. W warunkach

polskich szczególne znaczenie mają obszary związane z LGOM.

4. Odpady eksploatacyjne oraz materiały z sektora surowców skalnych mają znaczenie głównie w ujęciu długoterminowym. Ich potencjał wynika przede wszystkim z bardzo dużych wolumenów, a nie z wysokich koncentracji pierwiastków. W konsekwencji ich wykorzystanie uzależnione jest od rozwoju technologii odzysku niskoprocentowego oraz zmian uwarunkowań rynkowych.

5. Główne bariery wykorzystania zasobów antropogenicznych mają charakter systemowy. Obejmują one w szczególności: (a) ograniczenia informacyjne; (b) ograniczenia technologiczne; oraz (c) uwarunkowania ekonomiczne.

6. Zmieniające się podejście do surowców krytycznych rozszerza zakres potencjalnych źródeł. Wprowadzenie CRMA wskazuje na przesunięcie akcentu z rzadkości geologicznej w kierunku znaczenia gospodarczego i strategicznego. Uwzględnienie surowców takich jak skalenie potwierdza rosnącą strategiczną rolę niemetali.

7. Zasoby antropogeniczne wpisują się bezpośrednio w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz politykę surowcową UE. Ich wykorzystanie może przyczyniać się do zwiększenia udziału surowców wtórnych w gospodarce oraz ograniczenia zależności od importu, jednak wymaga odpowiednich ram technologicznych i instytucjonalnych.

8. Kluczową rolę odgrywają działania badawczo-rozwojowe oraz współpraca nauka-przemysł. Rozwój technologii odzysku, metod charakterystyki materiałów oraz narzędzi wspierających ocenę potencjału stanowi warunek konieczny dla przejścia od identyfikacji zasobów do odzysku czy re-eksploatacji.

9. W dłuższej perspektywie zasoby antropogeniczne mogą stanowić istotne uzupełnienie podaży surowców krytycznych, lecz nie zastąpią złóż pierwotnych. Ich rola powinna być postrzegana jako komplementarna, szczególnie w kontekście rosnącego zapotrzebowania wynikającego z transformacji energetycznej i cyfrowej.

Podsumowując, zasoby antropogeniczne w Polsce znajdują się obecnie na etapie przejścia od koncepcji teoretycznej do potencjalnego komponentu systemu surowcowego. Ich pełne wykorzystanie będzie jednak uzależnione od dalszego rozwoju technologicznego, poprawy dostępności danych oraz stworzenia sprzyjających warunków ekonomicznych i regulacyjnych.

Literatura

- [1] Stefanowicz, J. (2025). *Historia, definicje i regulacje złóż antropogenicznych*. Przegląd Geologiczny, 73(12). <https://www.pgi.gov.pl/dokumenty-pig-pib-all/publikacje-2/przeglad-geologiczny/2025/12-grudzien-5/11456-historia-definicje-i-regulacje-zloz-antropogenicznych/file.html>
- [2] Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2021). *Feasibility of re-processing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis*. Journal of Environmental Management, 284, 112060. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112060>
- [3] Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). *Recycling of rare earths: A critical review*. Journal of Cleaner Production, 51, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- [4] Blengini, G. A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C., Kayam, Y., Talens Peiró, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves Dias, P., Pavel, C., & Tzimas, E. (2017). *EU methodology for critical raw materials assessment: Policy needs and proposed solutions for incremental improvements*. Resources Policy, 53, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.008>
- [5] Blissett, R. S., & Rowson, N. A. (2012). *A review of the multi-component utilisation of coal fly ash*. Fuel, 97, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.024>
- [6] Britt, A., & Czarnota, K. (2024). *A review of critical mineral resources in Australia*. Australian Journal of Earth Sciences, 71, 1016–1049. <https://doi.org/10.1080/08120099.2024.2430279>
- [7] Chowdhury, M., & Talan, D. (2025). *From Waste to Wealth: A Circular Economy Approach to the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements and Battery Metals from Mine Tailings*. Separations, 12(2). <https://doi.org/10.3390/separations12020052>
- [8] Cossu, R., & Williams, I. D. (2015). *Urban mining: Concepts, terminology, challenges*. Waste Management, 45, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>
- [9] European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan – For a cleaner and more competitive Europe*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098>
- [10] European Commission. (2023). *Study on the critical raw materials for the EU 2023*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1>
- [11] European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (Critical Raw Materials Act)*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252
- [12] Fu, X., Beatty, D., Gaustad, G., Ceder, G., Roth, R., Kirchain, R., Bustamante, M., Babbitt, C., & Olivetti, E. (2020). *Perspectives on Cobalt Supply through 2030 in the Face of Changing Demand*. Environmental Science & Technology. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b04975>
- [13] Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The circular economy – A new sustainability paradigm?* Journal of Cleaner Production, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [14] Guatame-García, A., Castiblanco, A., & Pauliuk, S. (2021). *Challenges in the sampling and characterisation of mining waste to evaluate critical raw materials potential*. EGU General Assembly 2021. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-4734>
- [15] Hubau, A., Guezennec, A. G., Jouliau, C., Bodenan, F., & d'Hugues, P. (2020). *Bioleaching to reprocess sulfidic polymetallic primary mining residues: determination of metal leaching mechanisms*. Hydrometallurgy, 197, 105484. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105484>
- [16] Jones, B., Elliott, R., & Nguyen-Tien, V. (2020). *The EV revolution: The road ahead for critical raw materials demand*. Applied Energy, 280, 115072. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115072>
- [17] Kania, M., Zielińska, A., Pomorski, A., Gunia, P., & Majcher, A. (2021). *Badania mineralogiczno-petrograficzne i chemiczne gnejsu jako klucz do racjonalnej gospodarki złożem*. Górnictwo Odkrywkowe, 3(2021), 18–24. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-41afbabf-9980-48ab-b547-c1c51433dae7/c/GO_03_2021_1_04_18.pdf
- [18] Kerr, A. (2023). *Critical Minerals in the Context of Canada: Concepts, Challenges and Contradictions*. Geoscience Canada. <https://doi.org/10.12789/geocanj.2023.50.199>
- [19] Krook, J., Svensson, N., & Eklund, M. (2012). *Landfill mining: A critical review of two decades of research*. Waste Management, 32(3), 513–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.015>
- [20] Kurşunoğlu, S. (2025). *A Review on the Recovery of Critical Metals from Mine and Mineral Processing Tailings: Recent Advances*. Journal of Sustainable Metallurgy, 11, 2023–2050. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01126-y>
- [21] Lottermoser, B. G. (2010). *Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts (3rd ed.)*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- [22] Melcher, F., & Dunkel, F. (2025). *Can We Do It? Thoughts on Europe's Future Demand for Critical Mineral Raw Materials*. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 170, 595–603. <https://doi.org/10.1007/s00501-025-01637-x>
- [22] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. (2023). *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce*. <https://www.pgi.gov.pl>
- [23] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. (2024). *Wytwarzanie odpadów wydobywczych*. <https://www.pgi.gov.pl/odpady-wydobywcze/wytwarzanie.html>

- [24] Smol, M., Kulczycka, J., Henclik, A., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2015). *The possible use of sewage sludge ash (SSA) in the construction industry as a way towards a circular economy*. Journal of Cleaner Production, 95, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.051>
- [25] Tkaczyk, A., Bartl, A., Amato, A., Lapkovskis, V., & Petraniková, M. (2018). *Sustainability evaluation of essential critical raw materials: cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements*. Journal of Physics D: Applied Physics, 51. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaba99>
- [26] Waste2CRM. (n.d.). *Waste2CRM project*. <https://waste2crm.itpe.pl/index.php/pl/strona-glowna/>
- [27] SULTAN Project. (n.d.). *SULTAN – Sustainable Low Impact Mining Solutions*. <https://www.etn-sultan.eu>
- [28] PLATIRUS Project. (n.d.). *PLATIRUS – Platinum Group Metals Recovery Using Secondary Raw Materials*. <https://www.sintef.no/en/projects/2016/platirus-platinum-group-metals-recovery-using-seco/>
- [29] Główny Urząd Statystyczny. (2025). *Ochrona środowiska 2025*. Zakład Wydawnictw Statystycznych. <https://publikacje.new.stat.gov.pl/portal-publikacje/ochrona-srodowiska-2025>

