

Rola minerałów krytycznych i zasobów wodnych w produkcji zielonego wodoru¹

The role of critical minerals and water resources in green hydrogen production

MARTA GRZYWACZ

Autorka niezależna

 <https://orcid.org/0009-0006-6620-5262>

Abstrakt

Celem artykułu jest przedstawienie roli minerałów krytycznych i zasobów wodnych w produkcji zielonego wodoru. Omówiono czynniki ryzyka związane z wydobyciem tych minerałów, w tym jego wpływ na środowisko oraz dostępność wody w krajach produkcyjnych. Wskazano na poważne wyzwania związane z kumulowaniem produkcji minerałów krytycznych i zielonego wodoru w regionach o wysokim stresie wodnym, co może prowadzić do lokalnych konfliktów o dostęp do wody. Zidentyfikowano również zagrożenia wynikające ze skoncentrowania w kilku krajach wydobycia i rafinacji tych minerałów, mogącego powodować destabilizację łańcucha dostaw i ograniczenie rozwoju sektora zielonego wodoru. Zależność między tym sektorem i odnawialnymi źródłami energii

¹ Artykuł powstał na podstawie pracy licencjackiej pt. *Rola zielonego wodoru w zachowaniu bezpieczeństwa ekonomicznego państwa*, obronionej na Wydziale Społeczno-Ekonomicznym Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie. Autorka wykorzystała fragmenty rozdziału 2. *Zmienia geopolityka transformacji energetycznej – gospodarka wodorowa*. Praca została nagrodzona w XIII edycji konkursu Szefa ABW na najlepszą pracę doktorską, magisterską lub licencjacką dotyczącą bezpieczeństwa państwa w kontekście zagrożeń wywiadowczych, terrorystycznych, ekonomicznych.

sprawia, że w teorii nie powinno być między nimi bezpośredniej konkurencji o minerały. W praktyce jednak oba sektory rywalizują o dostęp do wspólnych surowców niezbędnych do ich rozwoju. Wskazano innowacyjne rozwiązania, takie jak odsalanie wody morskiej, zaawansowane systemy chłodzenia oraz recykling surowców, które zmniejszą zależność sektora wodorowego od kluczowych zasobów. Konieczne jest także opracowanie prognoz uwzględniających zmiany klimatyczne i związane z nimi susze, aby umożliwić tworzenie długoterminowej strategii zarządzania zasobami wodnymi w kontekście rosnącego zapotrzebowania na wodę w sektorze wodorowym.

Słowa kluczowe zielony wodór, minerały krytyczne, zasoby wodne, stres wodny, elektroliza

Abstract This article examines the role of critical minerals and water resources in green hydrogen production. It discusses the risks associated with the extraction of these minerals, including environmental impacts and water availability in production regions. Significant challenges have been identified in relation to the accumulation of critical minerals and the production of green hydrogen in regions of high water scarcity, which can lead to local conflicts over access to water. The study also identifies risks arising from the geographical concentration of mineral extraction and refining in a limited number of countries, which could destabilise supply chains and limit the growth of the green hydrogen sector. While the interdependence of the renewable energy and hydrogen sectors suggests that in theory there is no direct competition for critical minerals, in practice these two sectors compete for access to the same resources that are essential for their development. The article points to innovative solutions including seawater desalination, advanced cooling systems and raw material recycling as ways to reduce the hydrogen sector's dependence on critical resources. Finally, it highlights the importance of developing predictive models that incorporate climate change and drought scenarios to facilitate the development of long-term strategies for sustainable water resource management in response to the hydrogen sector's increasing water needs.

Keywords green hydrogen, critical minerals, water resources, water stress, electrolysis

Wprowadzenie

Technologie wodorowe odgrywają coraz większą rolę w dążeniu do neutralności klimatycznej oraz w realizacji celów zrównoważonego rozwoju w sektorze energetycznym. Zielony wodór (GH_2), wytwarzany w procesie elektrolizy z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (tj. energii słonecznej, wodnej, ciepłej i wiatrowej, dalej: OZE), stanowi obiecujące narzędzie do redukcji emisji w sektorach trudnych do elektryfikacji, takich jak przemysł ciężki czy transport dalekobieżny². Obecnie zielony wodór odpowiada za mniej niż 1% całkowitej produkcji wodoru, co wskazuje na jego marginalne znaczenie w globalnym rynku wodoru³. Zgodnie z prognozami Międzynarodowej Agencji Energetycznej (International Energy Agency, IEA) do 2050 r. zielony wodór może stanowić jednak nawet 94% światowej produkcji wodoru i odpowiadać za ok. 14% globalnego zużycia energii⁴. Wzrost udziału zielonego wodoru w globalnym miksie energetycznym wiąże się z wieloma wyzwaniami, w tym z rosnącym zapotrzebowaniem na minerały krytyczne, niezbędne do produkcji elektrolizerów, systemów magazynowania energii oraz infrastruktury dla OZE.

Termin „minerały krytyczne” (ang. *critical minerals*) zyskał na znaczeniu w kontekście transformacji energetycznej, jaka nastąpiła po 2008 r. w USA, kiedy podjęto szeroką debatę na temat ich roli w technologiach czystej energii⁵. Dwa lata później został on formalnie przyjęty przez Unię Europejską⁶. W 2010 r. Departament Energii Stanów Zjednoczonych (United States Department of Energy, DOE) opublikował raport wskazujący na zasadniczą rolę minerałów krytycznych w rozwoju technologii czystej energii⁷, co było podstawą do opracowania w 2018 r. listy tych minerałów⁸. Obecnie termin „minerały

² International Renewable Energy Agency, *Green Hydrogen: A guide to policy making*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf, s. 7 [dostęp: 12 V 2024].

³ International Energy Agency, *Critical Materials Strategy, Global Hydrogen Review 2024*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>, s. 59 [dostęp: 16 XI 2024].

⁴ International Renewable Energy Agency, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf, s. 48 [dostęp: 13 V 2024].

⁵ National Research Council, *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, Washington 2008. <https://doi.org/10.17226/12034>.

⁶ European Commission, *Critical raw materials for the EU*, Brussels 2010.

⁷ U.S. Department of Energy, *Critical Materials Strategy*, Washington 2010.

⁸ U.S. Department of Energy, *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, Washington 2018.

krytyczne” jest stosowany powszechnie, a zagrożenia powiązane z tą problematyką stanowią przedmiot szerokich analiz, w tym raportów przygotowywanych przez Międzynarodową Agencję Energii Odnawialnej (International Renewable Energy Agency, IRENA) oraz IEA.

Celem artykułu jest analiza roli minerałów krytycznych oraz zasobów wodnych w produkcji zielonego wodoru oraz identyfikacja potencjalnych zagrożeń i wyzwań związanych z tym procesem. W kontekście wykonalności tej technologii oraz potencjalnego wpływu jej wdrożenia pojawiają się następujące pytania:

- Jakie minerały krytyczne są kluczowe dla rozwoju technologii zielonego wodoru?
- Czy produkcja minerałów niezbędnych do wytwarzania zielonego wodoru jest skoncentrowana w określonych krajach?
- Czy istnieją minerały, w przypadku których zielony wodór może konkurować z innymi technologiami czystej energii w obliczu rosnącego popytu?
- Jaki wpływ na zasoby wodne może mieć wydobywanie oraz przetwarzanie minerałów wymaganych do masowego wdrożenia zielonego wodoru?

W artykule omówiono również innowacyjne rozwiązania technologiczne, które mogą przyczynić się do zrównoważonego wykorzystania minerałów krytycznych i zasobów wodnych w produkcji zielonego wodoru.

Autorka dokonała przeglądu literatury naukowej, raportów międzynarodowych instytucji, takich jak IEA, IRENA i Światowa Organizacja Handlu (World Trade Organization, WTO), analiz rynkowych, dokumentów rządowych oraz danych statystycznych.

Znaczenie minerałów krytycznych w produkcji zielonego wodoru

System energetyczny oparty na czystych technologiach zasadniczo różni się od tradycyjnego systemu opartego na paliwach kopalnych. Przeciętny samochód elektryczny wymaga sześciokrotnie większego zużycia surowców mineralnych niż pojazd spalinowy, a elektrownia wiatrowa na lądzie potrzebuje dziesięciokrotnie więcej surowców mineralnych niż elektrownia gazowa. Od 2010 r. średnia ilość minerałów potrzebnych do budowy nowej jednostki mocy wytwórczej wzrosła o 50%, co jest wynikiem rosnącego udziału OZE w globalnym miksie energetycznym. Zielony wodór, produkowany z OZE, jest również uzależniony od dostępności oraz

stabilności dostaw minerałów krytycznych⁹. Warto jednak zauważyć, że nie wszystkie minerały są klasyfikowane jako „krytyczne”.

Termin „minerał krytyczny” nie ma jednej, powszechnie przyjętej definicji, a jego interpretacja może różnić się w zależności od kontekstu oraz podmiotu dokonującego oceny. Stopień krytyczności minerału zmienia się w czasie i zależy od potrzeb gospodarki, społeczeństwa oraz dostępności zasobów mineralnych. Fundamentalne pytanie brzmi: dla kogo dany minerał jest krytyczny? Każde państwo i sektor przemysłu mogą definiować ten termin odmiennie, z uwzględnieniem własnych kryteriów¹⁰. Chociaż wiele krajów i branż opiera się na tych samych minerałach w określonych zastosowaniach, to ich ogólne wymagania dotyczące minerałów mogą się znacznie różnić w zależności od specyfiki produktów i procesów produkcyjnych.

W 2023 r. rząd USA opublikował dokument *Critical Materials List*, w którym ocenił minerały pod kątem ich znaczenia dla globalnych łańcuchów dostaw technologii czystej energii, bezpieczeństwa narodowego oraz rozwoju gospodarczego. Według DOE minerał krytyczny to każdy minerał, pierwiastek, substancja lub materiał niebędący paliwem, który spełnia dwa kryteria: istnieje wysokie ryzyko zakłócenia dostaw oraz odgrywa istotną rolę w co najmniej jednej technologii w sektorze energetycznym¹¹. Z tego powodu oprócz najczęściej używanych terminów „minerały krytyczne” lub „surowce krytyczne” funkcjonują także terminy „minerały strategiczne” i „minerały transformacji energetycznej”¹². Na podstawie podanych dwóch kryteriów DOE zidentyfikował łącznie 50 minerałów krytycznych (tabela 1). W tym artykule autorka odnosi się do minerałów krytycznych dla transformacji energetycznej (ang. *critical materials for energy*¹³).

⁹ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>, s. 5 [dostęp: 14 V 2024].

¹⁰ L. Depraeter, S. Goutte, *The Role and Challenges of Rare Earths in the Energy Transition*, working papers, SSRN, 23 VI 2023 r., s. 7. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4477111>.

¹¹ U.S. Department of Energy, *Critical Materials Assessment 2023*, „Federal Register” 2024, t. 88, nr 149, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2023-08-04/pdf/2023-16611.pdf>, s. 51792 [dostęp: 16 XI 2024].

¹² M. Hendriwardani, I. Ramdoo, *Critical Minerals: A primer*, <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2022/11/critical-minerals-primer-en-WEB.pdf>, s. 1 [dostęp: 13 XI 2024].

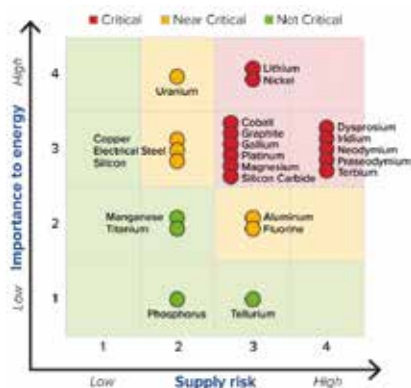
¹³ Rozumienie pojęć „critical material” i „critical mineral” w ujęciu DOE zob. U.S. Department of Energy, *What Are Critical Materials and Critical Minerals?*, <https://www.energy.gov/cmm/what-are-critical-materials-and-critical-minerals> [dostęp: 17 I 2025] – przyp. red.

Tabela 1. Lista minerałów krytycznych według DOE (2023).

Minerały krytyczne	Minerały krytyczne dla transformacji energetycznej
aluminium, antymon, arsen, baryt, beryl, bizmut, cer, cez, chrom, cyna, cynk, cyrkon, dysproz, erb, europ, fluoryt, gadolin, gal, german, grafit, hafn, holm, ind, iryd, iterb, itr, kobalt, lantan, lit, lutet, magnez, mangan, neodym, nikiel, niob, pallad, platyna, prazeodym, rod, rubid, ruten, samar, skand, tantal, tellur, terb, tul, tytan, wanad, wolfram	aluminium, dysproz, fluor, gal, iryd, kobalt, krzem, lit, magnez, miedź, naturalny grafit, neodym, nikiel, platyna, prazeodym, stal elektryczna, terb, węgiel krzemu

Źródło: opracowanie własne na podstawie: U.S. Department of Energy, *Critical Materials Assessment 2023*, „Federal Register” 2024, t. 88, nr 149, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2023-08-04/pdf/2023-16611.pdf>, s. 51792 [dostęp: 16 XI 2024]. Tłumaczenia w artykule pochodzą od autorki – dop. red.

Ostateczna lista minerałów krytycznych obejmuje minerały ocenione jako *critical* (krytyczne), *near critical* (prawie krytyczne) lub *not critical* (niekrytyczne) w perspektywie średnioterminowej (2025–2035). Oceny te opierają się na dwóch kryteriach: znaczeniu dla sektora energetycznego oraz ryzyku związanym z ich dostępnością, które są szacowane na poziomach od niskiego do wysokiego (rysunek 1). Na przykład nikiel, platyna i iryd charakteryzują się zarówno wysokim ryzykiem dostaw, jak i dużym znaczeniem gospodarczym. Ich niedobór lub niestabilność na rynku mogą poważnie wpłynąć na rozwój technologii wodorowych oraz powiązanych branż, co może mieć konsekwencje dla całej gospodarki.

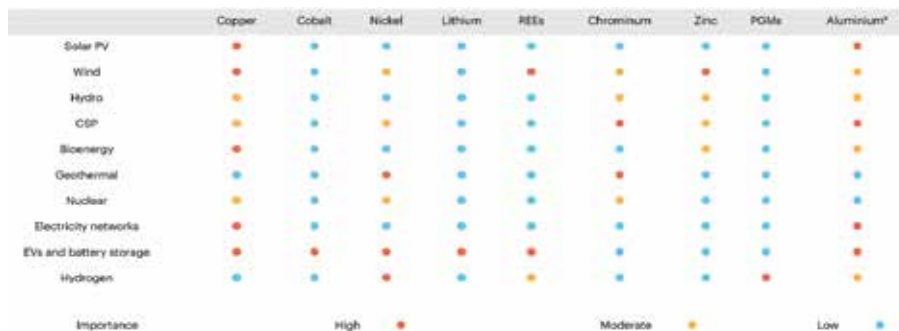


Rysunek 1. Ocena minerałów krytycznych pod względem ich znaczenia dla sektora energetycznego i dostępności w perspektywie średnioterminowej (2025–2035).

Źródło: U.S. Department of Energy, *What Are Critical Materials and Critical Minerals?*, <https://www.energy.gov/cmm/what-are-critical-materials-and-critical-minerals> [dostęp: 10 V 2024].

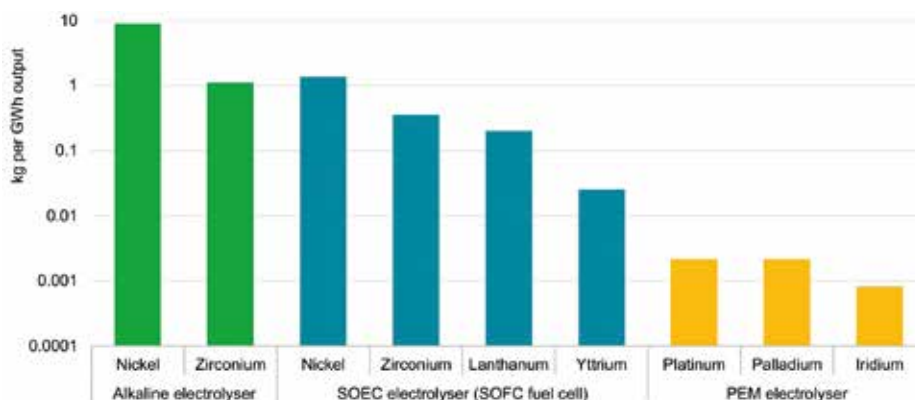
Zapotrzebowanie na minerały krytyczne do produkcji zielonego wodoru należy analizować w szerszym kontekście transformacji ku gospodarce niskoemisyjnej. Skala i rodzaj wymaganych minerałów zależą nie tylko od budowy elektrolizerów, lecz także od technologii OZE zasilających te urządzenia. Minerały są potrzebne do stworzenia infrastruktury przesyłowej, systemów magazynowania wodoru oraz ogniw paliwowych, które umożliwiają efektywne wykorzystanie wodoru jako nośnika energii. Istotnym elementem całego systemu są baterie magazynujące energię, które stabilizują dostawy z OZE i wspierają ciągłą pracę elektrolizerów. W tabeli 2 przedstawiono zapotrzebowanie na minerały krytyczne w różnych technologiach czystej energii. Część minerałów jest wykorzystywana w więcej niż jednej z nich, co może prowadzić do konkurencji o te same surowce. Ponadto rodzaj i ilość wymaganych minerałów różnią się w obrębie danej technologii.

Tabela 2. Zapotrzebowanie na minerały krytyczne w technologiach czystej energii.



Źródło: International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>, s. 45 [dostęp: 14 V 2024].

Zielony wodór jest wytwarzany w procesie elektrolizy wody, w którym są wykorzystywane elektrolizery oparte na minerałach krytycznych, takich jak: nikiel, cyrkon oraz metale z grupy platynowców (ang. *platinum group metals*, PGMs). Zapotrzebowanie na te surowce różni się w zależności od rodzaju elektrolizera – alkalicznego, PEM (ang. *proton exchange membrane*) lub SOEC (ang. *solid oxide electrolysis cell*), co zostało przedstawione na wykresie 1. Każdy z tych typów elektrolizerów ma specyficzne wymagania dotyczące minerałów, zależące od wydajności, skalowalności oraz warunków pracy danego elektrolizera.



Wykres 1. Szacunkowe zapotrzebowanie na minerały krytyczne dla trzech typów elektrolizerów.

Źródło: International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>, s. 111 [dostęp: 14 V 2024].

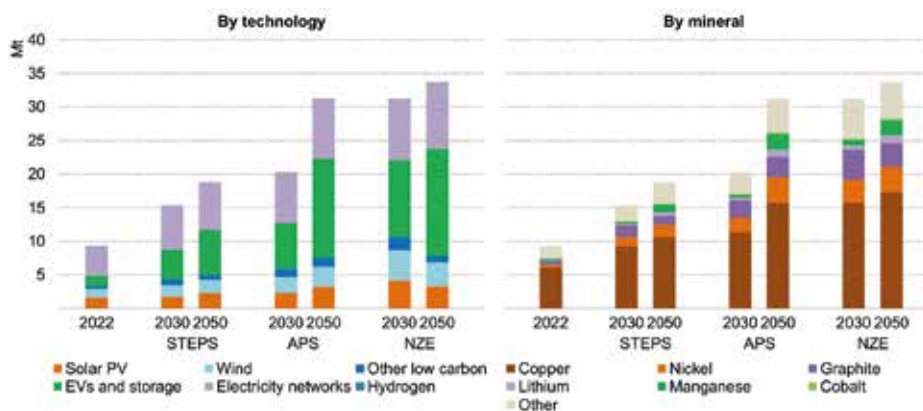
W elektrolizerze alkalicznym zapotrzebowanie na nikiel wynosi ok. 9 kg na każdą wyprodukowaną gigawatogodzinę (GWh) energii, a na cyrkon – ponad 1 kg na GWh. Z kolei elektrolizer stałotlenkowy (SOEC) ma niższe koszty materiałowe i wymaga ponad 1 kg niklu, 0,3 kg cyrkonu, 0,2 kg lantanowca oraz 0,02 kg itru na GWh produkcji. Elektrolizer z PEM potrzebuje najmniej minerałów krytycznych w porównaniu z innymi elektrolizerami: 0,002 kg platyny, 0,002 kg palladu i 0,001 kg irydu na GWh produkcji.

Kolejnym zagrożeniem jest zapotrzebowanie na minerały związane z budową OZE, które zasilają elektrolizery. Należy podkreślić, że całkowite zapotrzebowanie na minerały do produkcji energii odnawialnej znacznie przewyższa wymagania wynikające z budowy samych elektrolizerów. W przypadku morskich farm wiatrowych zapotrzebowanie na pierwiastki ziem rzadkich (ang. *rare earth elements*, REEs) jest szczególnie wysokie, głównie z uwagi na ich wykorzystanie w turbinach wiatrowych¹⁴. Do budowy tych turbin niezbędne są miedź, cynk, nikiel, chrom i aluminium. W produkcji paneli fotowoltaicznych duże znaczenie mają miedź i aluminium. Natomiast wytwarzanie pojazdów elektrycznych oraz systemów magazynowania energii w bateriach wymaga dużych ilości miedzi, kobaltu, niklu, litu, REEs oraz aluminium¹⁵.

¹⁴ J.E. Greenwald, M. Zhao, D.A. Wicks, *Critical mineral demands may limit scaling of green hydrogen production*, „Frontiers in Geochemistry” 2023, t. 1, s. 4. <https://doi.org/10.3389/fgeoc.2023.1328384>.

¹⁵ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 45.

Rozwój technologii czystej energii, w tym zielonego wodoru, stanowi jeden z głównych czynników napędzających wzrost zapotrzebowania na minerały krytyczne, co wiąże się z dużymi wyzwaniem, które dotyczą zapewnienia stabilnych dostaw tych surowców. Międzynarodowa Agencja Energetyczna prognozuje, że do 2030 r. popyt na minerały krytyczne w sektorze energii odnawialnej może wzrosnąć nawet trzykrotnie. Analiza ta bazuje na trzech scenariuszach IEA (wykres 2): STEPS (Stated Policies Scenarios), APS (Announced Pledges Scenario) i NZE (Net Zero Emissions by 2050 Scenario)¹⁶.



Wykres 2. Zapotrzebowanie na minerały krytyczne w technologii czystej energii w trzech scenariuszach IEA.

Źródło: International Energy Agency, *Critical Minerals Market Review 2023*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>, s. 63 [dostęp: 15 V 2024].

Wszystkie scenariusze wskazują na dynamiczny wzrost zapotrzebowania na minerały krytyczne. W scenariuszu APS prognozuje się, że do 2030 r. zapotrzebowanie wzrośnie ponaddwukrotnie, a do 2050 r. – aż trzykrotnie w porównaniu z poziomem z 2022 r. Z kolei w scenariuszu NZE, zakładającym szybsze tempo wdrażania technologii czystej energii, zapotrzebowanie na minerały krytyczne wzrośnie trzypółkrotnie w stosunku do obecnych wartości, osiągnie poziom ponad 30 mln ton w 2030 r. i na tym poziomie utrzyma się również w 2050 r. Największy wpływ na ten wzrost mają pojazdy elektryczne oraz magazyny energii, ale

¹⁶ International Energy Agency, *Critical Minerals Market Review 2023*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf>, s. 65 [dostęp: 15 V 2024].

duży jest także wkład niskoemisyjnych źródeł energii i sieci elektroenergetycznych. W przypadku zielonego wodoru zapotrzebowanie na minerały krytyczne również będzie rosło, chociaż jego udział w całkowitym zapotrzebowaniu będzie mniejszy niż w przypadku innych technologii. Ponadto rozwój zielonego wodoru może napotkać trudności wynikające z ograniczonej dostępności REEs, których podaż jest obecnie silnie skoncentrowana w kilku regionach na świecie. Sytuację dodatkowo komplikuje rosnące zapotrzebowanie na te pierwiastki ze strony innych technologii czystej energii¹⁷. W przypadku elektrolizerów PEM zapotrzebowanie na iryd może przekroczyć w latach 40. XXI w. nawet 160% obecnej produkcji¹⁸. W związku z tym zapewnienie odpowiedniej podaży PGMs i REEs będzie poważnym wyzwaniem w skalowaniu produkcji zielonego wodoru.

Dostępność minerałów krytycznych i związana z tym geopolityka

Minerały krytyczne stają się coraz bardziej istotnym aspektem geopolityki, zwłaszcza w kontekście rosnącej rywalizacji między Stanami Zjednoczonymi a Chinami¹⁹. Głównym punktem tej rywalizacji jest strategiczna dominacja Chin nad łańcuchami dostaw minerałów krytycznych, co ma znaczący wpływ na politykę globalną²⁰. Chiny produkują ponad 60% światowych zasobów REEs i posiadają niemal wszystkie zakłady rafinacji tych surowców. Inne państwa również zyskały dominującą pozycję w produkcji i wydobyciu najważniejszych minerałów, co zapewnia im przewagę strategiczną oraz przyciąga inwestorów. Przykładami są Demokratyczna Republika Konga (DRK) mająca 74-procentowy udział w globalnej produkcji kobaltu, Republika Południowej Afryki (RPA) produkująca 67% platyny, oraz Indonezja, na którą przypada 50% światowej produkcji niklu (tabela 3). Wiadome jest, że gdy zaopatrzenie w dany surowiec zależy od jednego państwa, łańcuch dostaw staje się bardziej podatny na zakłócenia niż wtedy, gdy źródeł jest kilka. Niektóre minerały, np. lit, są szeroko dostępne i mogą być pozyskiwane z różnych krajów, np.: Australii, Chile, Chin, Argentyny i Brazylii²¹.

¹⁷ J.E. Greenwald, M. Zhao, D.A. Wicks, *Critical mineral demands...*, s. 1.

¹⁸ S. Moreira, T.J. Laing, *Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*, Washington 2022, s. 10.

¹⁹ S. Kalantzakos, *The Race for Critical Minerals in an Era of Geopolitical Realignments*, „The International Spectator” 2020, t. 55, nr 3. <https://doi.org/10.1080/03932729.2020.1786926>.

²⁰ Mo Ibrahim Foundation, *Africa's critical minerals: Africa at the heart of a low-carbon future*, <https://mo.ibrahim.foundation/sites/default/files/2022-11/minerals-resource-governance.pdf>, s. 2 [dostęp: 14 V 2024].

²¹ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 30.

Tabela 3. Najwięksi producenci i największe rezerwy wybranych minerałów na świecie (2023).

Minerał krytyczny	Kraj o największej produkcji	Udział kraju w światowej produkcji (%)	Kraj z największymi zasobami	Udział kraju w światowych zasobach (%)
Platyna	RPA	67%	RPA	89%* (wszystkie PGMs)
Pallad	Rosja	44%	RPA	89%* (wszystkie PGMs)
Nikiel	Indonezja	50%	Indonezja	42%
Cyrkon	Australia	31%	Australia	74%
REEs	Chiny	69%	Chiny	40%
Kobalt	DRK	74%	DRK	55%
Grafit	Chiny	77%	Chiny	28%
Chrom	RPA	44%	Kazachstan	41%
Mangan	RPA	36%	RPA	32%
Boksyt	Australia	25%	Gwinea	25%
Miedź	Chile	23%	Chile	19%

Źródło: opracowanie własne na podstawie: U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2024*. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.

Rozwój technologii zielonego wodoru opiera się na takich surowcach, jak PGMs i nikiel. Technologia PEM, zyskująca na znaczeniu w tym sektorze, wymaga zastosowania katalizatorów opartych na platynie i irydzie. Republika Południowej Afryki posiada aż 89% światowych rezerw PGMs, co czyni ją dominującym graczem. Natomiast technologia alkaliczna, w której jest używany nikiel, opiera się głównie na zasobach z Indonezji i Filipin. W kontekście transformacji energetycznej kobalt odgrywa najważniejszą rolę w produkcji baterii litowo-jonowych, wykorzystywanych w pojazdach elektrycznych, magazynowaniu energii oraz turbinach wiatrowych. Demokratyczna Republika Konga ma aż 55% światowych rezerw kobaltu i odpowiada za ponad 70% jego globalnej podaży. Na RPA przypada 44% globalnej produkcji chromu, stosowanego w technologiach energii słonecznej, geotermalnej, jądrowej, wodnej i wiatrowej, oraz ponad 32% światowych rezerw manganu, wykorzystywanego w odnawialnych źródłach energii, pojazdach elektrycznych

i magazynach energii²². Boksyt, podstawowy surowiec do produkcji aluminium, ma znaczenie w technologii niskoemisyjnej, zwłaszcza w ogniwach fotowoltaicznych²³. Jedną czwartą światowych rezerw boksytu dysponuje Gwinea i jednocześnie jest drugim na świecie jego producentem, zaraz po Australii. Miedź, wykorzystywana w OZE, występuje w dużych ilościach w Chile, RPA i DRK. Złoża miedzi znajdują się również w Mauretanii, Mali, Maroku i Egipcie. Grafit, ważny składnik baterii litowo-jonowych stosowanych w pojazdach elektrycznych oraz systemach magazynowania energii, jest w dużej mierze produkowany w Chinach, ale także w Madagaskarze i Mozambiku, które zajmują odpowiednio drugie i trzecie miejsce na świecie pod względem produkcji tego surowca²⁴.

Z perspektywy geopolitycznej dominacja krajów afrykańskich w dostarczaniu surowców niezbędnych do produkcji technologii zielonego wodoru może znacznie zwiększyć ich znaczenie na arenie międzynarodowej, zwłaszcza w kontekście globalnej transformacji energetycznej. Rosnąca zależność od afrykańskich surowców wiąże się z nasileniem rywalizacji międzynarodowej o dostęp do tych zasobów²⁵. Co więcej, wydobywanie minerałów kluczowych dla transformacji energetycznej jest obecnie bardziej skoncentrowane geograficznie niż wydobywanie ropy naftowej czy gazu ziemnego. W związku z tym nowy, zeroemisyjny system energetyczny może stać się bardziej podatny na niestabilność polityczną, ryzyko geopolityczne oraz ograniczenia eksportowe. Jak pokazuje wykres 3, przetwarzanie tych minerałów jest jeszcze bardziej skoncentrowane geograficznie niż ich wydobywanie. W tej dziedzinie dominująca rola przypada Chinom.

Długoterminowa strategia Chin mająca na celu przejęcie kontroli nad całym łańcuchem dostaw rozpoczęła się już w 1992 r., kiedy zaczęły one nadawać priorytetowe znaczenie surowcom krytycznym. Polityka inwestowania w zagraniczne projekty wydobywcze skutecznie umacniała ich pozycję w tym sektorze²⁶. Chociaż Australia i Chile odpowiadają za 70% światowej produkcji litu, to chińskie firmy państwowe kontrolują aż jedną trzecią tego rynku, głównie dzięki dominacji w sektorze rafinacji. W DRK, gdzie produkuje się prawie 70% światowego kobaltu,

²² Mo Ibrahim Foundation, *Africa's critical minerals...*, s. 3–4 [dostęp: 14 V 2024].

²³ P. Bosse i in., *The minerals essential to the energy and digital transitions: An opportunity for Africa?*, Agence Française de Développement, <https://www.afd.fr/en/ressources/minerals-essential-energy-and-digital-transitions-opportunity-africa> [dostęp: 14 V 2024].

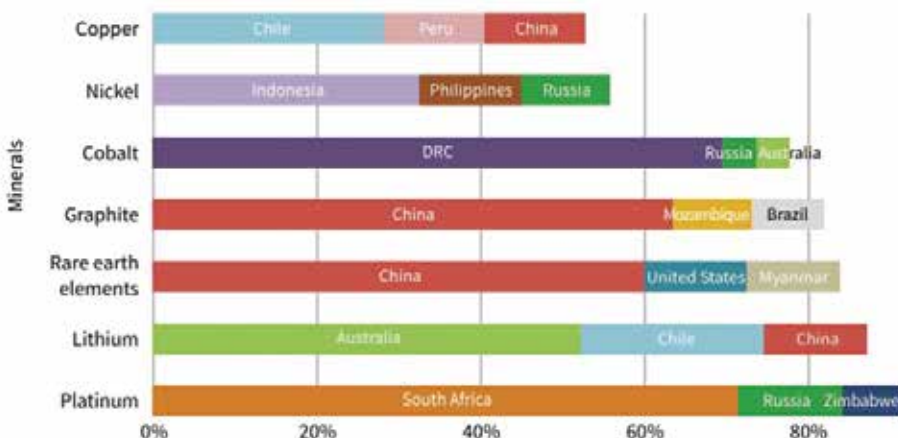
²⁴ U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2024*. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.

²⁵ J. Noailly i in., *The role of critical materials for the energy transition. Challenges and opportunities*, „Swiss Academies Reports” 2024, t. 19, nr 3, s. 5–6. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12168441>.

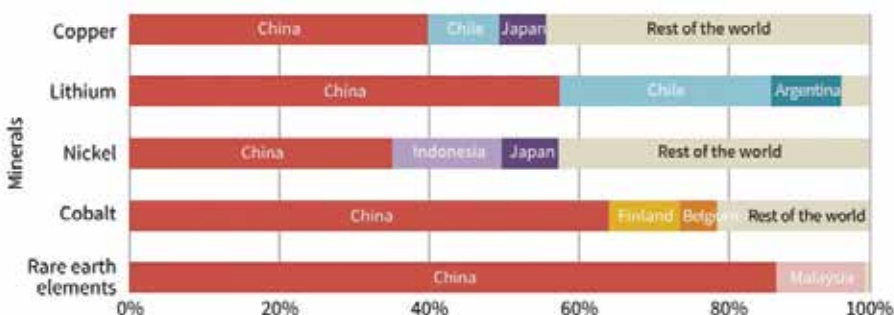
²⁶ W.M. Morrison, R. Tang, *China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States*, Washington 2012, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc85418/>, s. 1 [dostęp: 12 XI 2024].

chińskie przedsiębiorstwa kontrolują aż 80% jego wydobycia. Chiny inwestują także w rozwój przemysłu mineralnego w Indonezji. W 2024 r. chińskie firmy kontrolowały w tym kraju 82% produkcji niklu wykorzystywanego w bateriach²⁷.

1a: Share of top three producing countries in total production for selected critical minerals, 2019



1b: Share of processing volume by country for selected critical minerals, 2019



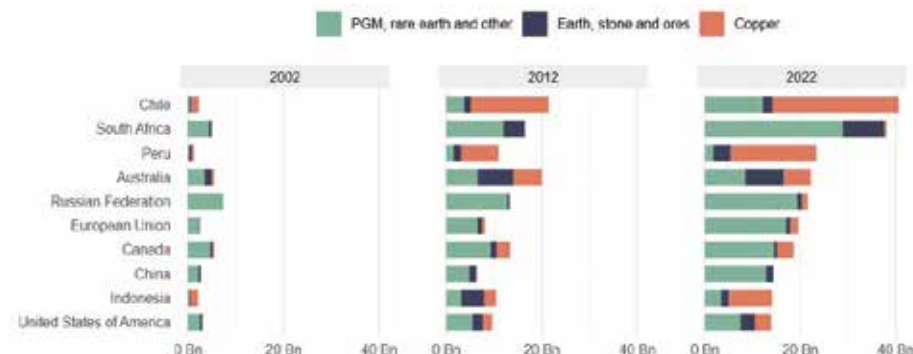
Wykres 3. Udział krajów w całkowitej produkcji i ilości przetworzonych minerałów krytycznych (2019).

Źródło: International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>, s. 30–31 [dostęp: 14 V 2024].

Rozwój rynku surowców krytycznych i związane z nim inwestycje wpływają na nowe dynamiki geopolityczne i zmianę globalnego układu sił. Zgodnie z danymi

²⁷ E. Kaboli, *Critical Minerals and Materials for Selected Energy Technologies*, Congressional Research Service, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R48149>, s. 8 [dostęp: 12 XI 2024].

WTO w 2022 r. Chile miało 11% udziału i zajmowało pierwsze miejsce w globalnym eksporcie surowców krytycznych, a RPA, Peru, Australia i Rosja miały po ok. 6% światowego eksportu, co przedstawia wykres 4²⁸.



Wykres 4. Najwięksi eksporterzy minerałów krytycznych w latach 2002, 2012 i 2022 (w mld dolarów).

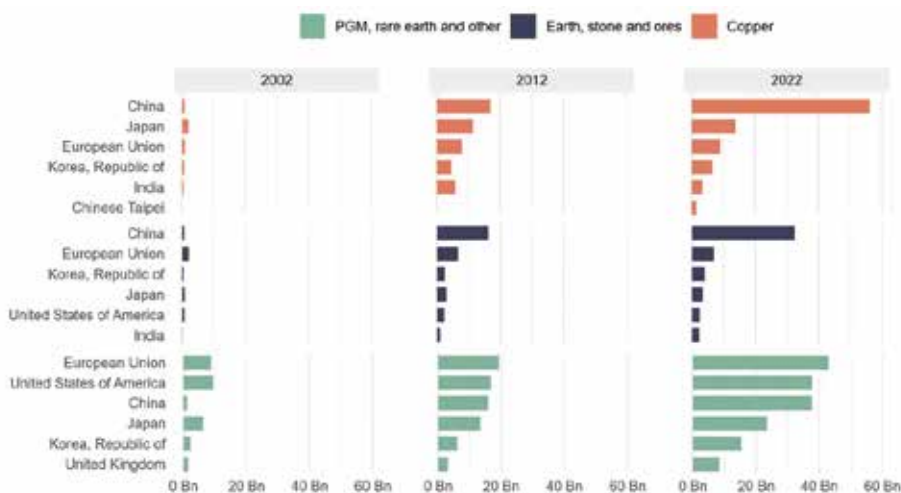
Źródło: M. Snoussi-Mimouni, S. Avérous, *High demand for energy-related critical minerals creates supply chain pressures*, World Trade Organization, 10 I 2024 r., https://www.wto.org/english/blogs_e/data_blog_e/blog_dta_10jan24_e.htm [dostęp: 12 V 2024].

Najczęściej eksportowanymi minerałami krytycznymi na świecie są miedź, PGMs oraz REEs. W eksporcie miedzi liderem jest Chile, odpowiadające za ponad jedną czwartą jej światowego eksportu. Na kolejnych miejscach są Peru (19%) i Indonezja (9%). Republika Południowej Afryki jest natomiast głównym eksporterem metali PGMs, REEs oraz innych minerałów niezbędnych do rozwoju technologii zielonego wodoru. W 2022 r. miała ona ok. 14% udziału w globalnym rynku. Wzrost znaczenia krajów eksportujących surowce krytyczne może spowodować dalsze zmiany w równowadze geopolitycznej na świecie.

Z drugiej strony, jak wynika z badania WTO, nie wszystkie kraje dysponują wystarczającymi rezerwami surowców mineralnych do ich wydobycia i eksportu. W związku z tym wiele państw jest uzależnionych od importu minerałów krytycznych, aby zaspokoić swoje potrzeby. Koncentracja produkcji rodzi obawy o potencjalne ograniczenia eksportowe oraz niestabilność geopolityczną, zwłaszcza w kontekście transformacji energetycznej. Sytuacja jest szczególnie problematyczna dla krajów UE, która niemal w całości polega na imporcie surowców

²⁸ M. Snoussi-Mimouni, S. Avérous, *High demand for energy-related critical minerals creates supply chain pressures*, World Trade Organization, 10 I 2024 r., https://www.wto.org/english/blogs_e/data_blog_e/blog_dta_10jan24_e.htm [dostęp: 12 V 2024].

z Chin. Dotyczy to zwłaszcza ogniw fotowoltaicznych, gdyż w skali globalnej UE wytwarza jedynie 4% surowców i 12% przetworzonych materiałów. Jeszcze trudniej jest w przypadku baterii litowo-jonowych, dlatego że udział UE w globalnej produkcji to zaledwie 2% surowców i 4% przetworzonych materiałów²⁹. Analogicznie jak w eksporcie, najczęściej importowanymi minerałami są miedź, PGMs i REEs. Jak pokazuje wykres 5, Chiny importują znacznie więcej miedzi niż jakiegokolwiek inne państwo i są największym importerem 13 z 17 minerałów z kategorii „Earth, stone and ore minerals”³⁰. Z kolei UE jest największym importerem PGMs, REEs oraz innych minerałów i wyprzedza pod tym względem Stany Zjednoczone, Chiny i Japonię.



Wykres 5. Najwięksi importerzy minerałów krytycznych w latach 2002, 2012 i 2022 (w mld dolarów).

Źródło: M. Snoussi-Mimouni, S. Avérous, *High demand for energy-related critical minerals creates supply chain pressures*, World Trade Organization, 10 I 2024 r., https://www.wto.org/english/blogs_e/data_blog_e/blog_dta_10jan24_e.htm [dostęp: 12 V 2024].

²⁹ J. Noailly i in., *The role of critical materials...*, s. 6.

³⁰ „Earth, stone and ore minerals” – surowce obejmujące minerały przemysłowe, rudy metali oraz surowce skalne, takie jak: glina, fosfority, skały budowlane i inne zasoby geologiczne wykorzystywane w zaawansowanych technologiach, przemyśle chemicznym oraz budownictwie.

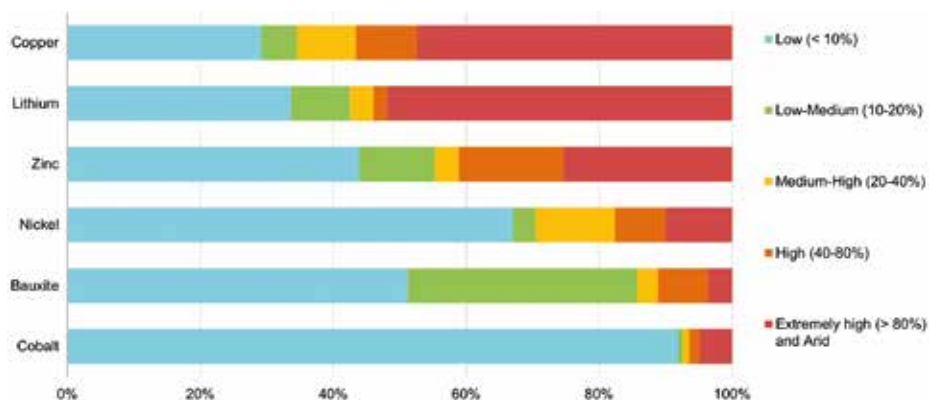
Wyzwania związane z łańcuchem dostaw minerałów krytycznych

Obawy dotyczące zmienności cen oraz bezpieczeństwa dostaw pozostają aktualne w nowoczesnym systemie energetycznym opartym na zielonym wodorze, elektryfikacji i odnawialnych źródłach energii. Fundamentalnym problemem jest wysoka koncentracja geograficzna produkcji tych minerałów, która w znacznym stopniu wpływa zarówno na ich dostępność, jak i wahania cen. Kraje członkowskie UE oraz USA są w dużym stopniu uzależnione od importu minerałów krytycznych, takich jak platyna, iryd czy nikiel, z RPA i Chin. Ta zależność stwarza zagrożenie dla stabilności dostaw w sektorze zielonego wodoru. Ponadto można wskazać cztery dodatkowe czynniki zwiększające ryzyko zawężenia rynku oraz cyklicznych wahań cen, które mogą spowolnić transformację energetyczną. Należą do nich: wysoka ekspozycja na ryzyko klimatyczne, spadek jakości zasobów mineralnych, problemy środowiskowe związane z wydobywaniem oraz nierównowaga między podażą a popytem na minerały krytyczne³¹.

W kontekście zwiększającego się ryzyka zmian klimatycznych szybko rozwijające się rynki minerałów krytycznych znajdujące się w Australii, Chinach i państwach afrykańskich są szczególnie narażone na zakłócenia spowodowane zjawiskami fizycznymi, takimi jak ekstremalne upały, powodzie czy trzęsienia ziemi. Jednym z najpoważniejszych zagrożeń pozostaje wysoki poziom stresu wodnego (ang. *water stress*) w krajach będących głównymi producentami minerałów krytycznych. Niedobór wody stanowi poważną barierę w wydobywaniu, przetwarzaniu i dystrybucji tych surowców. Miedź i lit charakteryzują się szczególnie wysokim zapotrzebowaniem na wodę w procesach technologicznych, co czyni te procesy bardziej podatnymi na skutki niedoborów wody. Obecnie ponad 50% globalnej produkcji miedzi i litu jest zlokalizowane na obszarach dotkniętych wysokim poziomem stresu wodnego, co znacznie zwiększa ryzyko zakłóceń w ich dostępności i wpływa na stabilność globalnych łańcuchów dostaw (wykres 6)³².

³¹ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 11–12.

³² Tamże, s. 12.



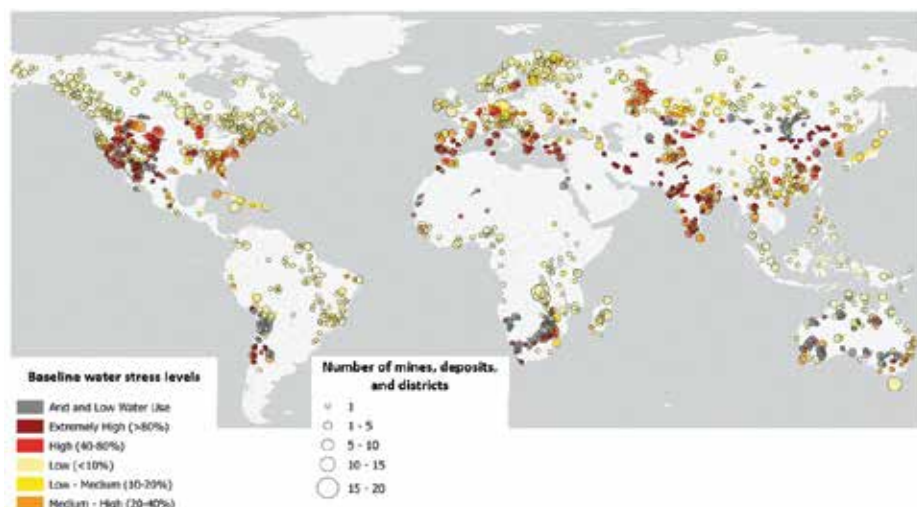
Wykres 6. Procentowy udział produkcji wybranych minerałów krytycznych w odniesieniu do poziomu stresu wodnego w 2020 r.

Źródło: International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>, s. 128 [dostęp: 14 V 2024].

Zgodnie z analizą przeprowadzoną przez World Resources Institute w 2023 r. co najmniej 16% kopalń, złóż i obszarów wydobywania najważniejszych minerałów znajdowało się w regionach świata, gdzie niedobór wody jest wysoki lub bardzo wysoki (rysunek 2). Niedobór ten jest szczególnie dotkliwy w krajach południowej Afryki, w tym w RPA, skąd pochodzi większość eksportowanych PGMs oraz REEs. Demokratyczna Republika Konga, największy producent kobaltu na świecie, oraz Chile, największy światowy eksporter miedzi, również są zaniepokojone poziomem konsumpcji wody i zanieczyszczeniem środowiska³³. Międzynarodowa Agencja Energetyczna prognozuje, że odsetek kopalń zlokalizowanych na obszarach dotkniętych wysokim niedoborem wody będzie wzrastać³⁴.

³³ S. Lakshman, *More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions*, World Resources Institute, 10 I 2024 r., <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-mining-water-impacts> [dostęp: 13 V 2024].

³⁴ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 131.



Rysunek 2. Kopalnie, złoża i obszary wydobywania minerałów na świecie oraz poziom stresu wodnego.

Źródło: S. Lakshman, *More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions*, World Resources Institute, 10 I 2024 r., <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-mining-water-impacts> [dostęp: 13 V 2024].

Następny czynnik ryzyka to pogarszająca się jakość surowców mineralnych. W ostatnich latach jakość rud mineralnych systematycznie spada, co jest spowodowane wcześniejszą eksploatacją złóż o wyższej zawartości metalu. Do istnienia tego trendu dodatkowo przyczynia się postęp technologiczny umożliwiający eksploatację złóż o niższych parametrach. W przypadku kopalni miedzi średnia zawartość metalu w rudzie zmniejszyła się na świecie o ok. 25% w ciągu zaledwie 10 lat³⁵. W Chile zawartość miedzi w rudzie obniżyła się aż o 30% w ciągu ostatnich 15 lat. Pogorszenie jakości rud skutkuje koniecznością zużycia większej ilości energii do pozyskania metalu, co z kolei zwiększa koszty produkcji, emisję gazów cieplarnianych i ilość odpadów³⁶.

Kolejnym negatywnym czynnikiem jest znaczny wzrost zapotrzebowania na surowce krytyczne. Ich wydobywanie i transport prowadzą bowiem do wielu problemów środowiskowych, takich jak: zanieczyszczenie powietrza, skażenie wody i gleby toksycznymi substancjami, degradacja krajobrazu, utrata bioróżnorodności oraz nadmierna produkcja odpadów. Procesy te mają również niekorzystne skutki społeczne. Jednym

³⁵ G. Calvo i in., *Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?*, „Resources” 2016, t. 5, nr 4, 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>.

³⁶ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 12.

z problemów jest wydawanie przez państwa licencji na wydobycie surowców prywatnym firmom, co często prowadzi do naruszenia praw lokalnych społeczności do ziemi³⁷.

Ryzyko wiąże się także z niedopasowaniem tempa zmian w strukturze popytu na minerały krytyczne do tempa rozwoju nowych projektów wydobywczych. Skutkiem tego jest duża zmienność cen na rynku tych surowców. Głównie źródło zróżnicowania popytu wynika z niepewności związanej z ambitnymi celami klimatycznymi, które są ogłaszane i przyjmowane na poziomie międzynarodowym. Brak pewności co do scenariuszy przyszłości może stanowić barierę w podejmowaniu przez przedsiębiorstwa decyzji inwestycyjnych, co w nadchodzących latach może prowadzić do nierównowagi między podażą a popytem. Na przykład w najbliższym czasie oczekuje się nadwyżki podaży litu i kobaltu, a w przypadku wodorotlenku litu, niklu oraz niektórych REEs (np. neodymu i dysprozu) mogą z kolei wystąpić problemy z podażą z powodu wzrostu popytu³⁸.

Działania na rzecz poprawy bezpieczeństwa w łańcuchu dostaw minerałów krytycznych

W odpowiedzi na rosnące ryzyko związane z uzależnieniem od eksportu minerałów krytycznych z kilku krajów konieczne stanie się zdywersyfikowanie źródeł dostaw. Unia Europejska i Stany Zjednoczone powinny przyspieszyć rozwój alternatywnych źródeł surowców oraz inwestować w technologie recyklingu, aby zmniejszyć zależność od obecnych liderów rynku. Taka dywersyfikacja nie tylko poprawi stabilność łańcuchów dostaw, lecz także wesprze rozwój zielonego wodoru i innych technologii energetycznych. Zmniejszy to wpływ decyzji politycznych innych krajów na dostępność surowców.

W tym kontekście bardzo duże znaczenie mają innowacje technologiczne. Nowoczesne technologie wydobywania, optymalizacja procesów produkcyjnych, zmniejszenie zużycia materiałów oraz wprowadzenie nowych surowców mogą istotnie wpłynąć na redukcję zapotrzebowania na minerały. Przykładem może być rozwój baterii litowo-żelazowo-fosforanowych (oznaczanych jako LiFePO₄ czy LFP), które ograniczają zależność od kobaltu i niklu³⁹. Podobne innowacje pojawiające w innych sektorach, m.in. w ogniwach słonecznych i technologiach wodorowych, mogą

³⁷ M. Sengupta, *Environmental Impacts of Mining: Monitoring, Restoration, and Control*, wyd. 2, CRC Press 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003164012>.

³⁸ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 120.

³⁹ R. Zilli, J. André, S. Bellucci, *Policy analysis: Securing sustainable critical raw material supply for clean energy in Europe*, European Energy Research Alliance 2023, https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=1235:EERA_Policy_Analysis_on_Critical_Raw_Materials_Layout_Digital-for-publication, s. 16 [dostęp: 13 V 2024].

zmniejszyć presję na zasoby naturalne. Przykładem może być zredukowanie o 40–50% w ciągu ostatnich dziesięciu lat zużycia srebra i krzemu w ogniwach słonecznych, co umożliwiło spektakularny wzrost ich wykorzystania. Dzięki ciągłemu doskonaleniu i usprawnianiu technologii elektrolizerów oczekuje się z kolei, że w następnej dekadzie zmniejszy się o połowę zapotrzebowanie na nikiel, cyrkon, aluminium, stal, platynę, iryd, lantan oraz itr⁴⁰. W ramach prac badawczo-rozwojowych są prowadzone również badania nad innowacyjnymi rozwiązaniami, takimi jak magnesy trwałe niezawierające pierwiastków ziem rzadkich (REE-free), elektrolizery z membranami anionowymi niewymagającymi PGMs (PGM-free AEM) oraz integracja elektrolizy wody z alternatywnymi źródłami ciepła. Wdrożenie tych technologii może nie tylko poprawić efektywność energetyczną i materiałową produkcji zielonego wodoru, lecz także obniżyć jej koszty oraz zminimalizować negatywny wpływ na środowisko⁴¹.

Oprócz innowacji technologicznych drugim elementem strategii ograniczania presji na zasoby naturalne jest rozwój efektywnych systemów recyklingu. Recykling zużytych produktów, zwłaszcza baterii, elektroniki czy komponentów energetycznych, pozwala na odzyskiwanie cennych surowców i zmniejszenie zapotrzebowania na nowe zasoby. Wdrożenie skutecznych systemów recyklingu, wspieranych normami dotyczącymi śladów węglowych materiałów, mogłoby poprawić ekonomiczną opłacalność tego procesu i sprawić, że stanie się on konkurencyjny wobec tradycyjnego wydobywania. Integracja tych rozwiązań z innowacjami w projektowaniu produktów o dłuższej trwałości i mniejszym zapotrzebowaniu na minerały może w dłuższej perspektywie zmniejszyć globalną presję na zasoby⁴².

Ograniczenie zapotrzebowania na wydobycie minerałów krytycznych ma także pozytywny wpływ na zmniejszenie zużycia wody, co z kolei pomoże zredukować ryzyko lokalnych konfliktów o zasoby wodne i wesprze stabilność energetyczną w tych regionach. W rezultacie wdrożenie zrównoważonych strategii zarządzania wodą powinno stać się priorytetem dla organów odpowiedzialnych za politykę wodną i energetyczną. Należy również prowadzić dialog z lokalnymi społecznościami, które często borykają się z problemem zanieczyszczenia wód lub ich niedoboru. Uwzględnienie ich opinii w procesach decyzyjnych może przyczynić się do opracowania bardziej zrównoważonych praktyk, co zwiększy akceptację dla projektów wydobywczych. Takie podejście sprzyja efektywnemu zarządzaniu zasobami wodnymi i wspiera długoterminową stabilność łańcuchów dostaw.

Pomimo wdrożenia strategii dywersyfikacji dostaw, innowacji technologicznych oraz efektywnego recyklingu wciąż istnieje wyzwanie związane z nierównowagą

⁴⁰ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions...*, s. 14, 113.

⁴¹ J.E. Greenwald, M. Zhao, D.A. Wicks, *Critical mineral demands...*, s. 5.

⁴² J. Noailly i in., *The role of critical materials...*, s. 8.

między podażą a popytem na minerały krytyczne. Aby sprostać temu problemowi, niezmiernie ważne będzie zapewnienie przez rządy jasnych i stabilnych sygnałów dotyczących transformacji energetycznej. Polityka wspierająca inwestycje w sektor wydobywania oraz alternatywne źródła surowców będzie miała decydujący wpływ na przyszły rozwój rynku surowców. Jeśli przedsiębiorstwa nie będą miały zaufania do polityki energetycznej i klimatycznej poszczególnych krajów, podejmą decyzje inwestycyjne na podstawie bardziej zachowawczych prognoz. Może to spowolnić rozwój i utrudnić w przyszłości zapewnienie stabilności w łańcuchach dostaw minerałów. Podsumowując, tylko zintegrowana polityka wspierająca dywersyfikację źródeł, innowacje technologiczne oraz efektywny recykling może zapewnić bezpieczeństwo energetyczne państwa, zmniejszyć ryzyko kryzysów energetycznych i wzmocnić stabilność rynku surowców w perspektywie długoterminowej.

Zielony wodór a bezpieczeństwo wodne

Wykorzystanie wody oraz problem wysokiego poziomu stresu wodnego dotyczą nie tylko jej użycia w procesie wydobywania i przetwarzania minerałów krytycznych, lecz także produkcji zielonego wodoru. Do wytwarzania GH_2 stosuje się elektrolizery, które wymagają ultraczystej wody. Wysoki poziom czystości jest niezbędny ze względu na negatywny wpływ zanieczyszczeń (korozja sprzętu i powstawanie chloru) na trwałość stosu elektrolizera. Warto poznać dokładne zapotrzebowanie na wodę konieczną do produkcji zielonego wodoru, aby lepiej rozumieć wpływ tego procesu na zasoby wodne⁴³.

Elektroliza wody charakteryzuje się najmniejszym śladem wodnym spośród wszystkich procesów produkcji wodoru. Do wyprodukowania 1 kg wodoru potrzeba 9 kg wody. Dla porównania, produkcja wodoru z gazu ziemnego z zastosowaniem technologii wychwytywania i składowania dwutlenku węgla (ang. *carbon capture, utilization and storage*) zużywa od 13 do 18 kg wody na 1 kg wodoru, a proces zgazowania węgla wymaga od 40 do 86 kg wody na 1 kg wodoru, w zależności od zużycia wody przy wydobywaniu węgla. Jeśli uwzględni się straty i nieefektywność procesu elektrolizy, trzeba przyjąć, że do wyprodukowania 1 kg wodoru potrzeba ok. 20 kg wody. Aby zobrazować wpływ produkcji zielonego wodoru na dostępność wody, można podać przykład elektrolizera o mocy 1 GW, który działa z efektywnością 75-procentową przez 8000 godzin rocznie (ok. 11 miesięcy) i produkuje 150 000 ton

⁴³ European Patent Office, International Renewable Energy Agency, *Patent insight report: Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production*, https://link.epo.org/web/patent_insight_report_innovation_trends_for_electrolyzers_in_hydrogen_production_en.pdf, s. 5 [dostęp: 14 XI 2024].

wodoru. Przy zużyciu 20 kg wody na każdy kilogram wodoru proces ten pochłania ok. 3 mln ton wody rocznie. To odpowiada mniej więcej rocznemu zużyciu wody przez miasto liczące 70 000 mieszkańców⁴⁴. W regionach, gdzie dostęp do wody jest ograniczony, takie zużycie może prowadzić do poważnych problemów, zwłaszcza w przypadku braku zrównoważonego zarządzania zasobami wodnymi.

Regiony o największym potencjale energii odnawialnej i przestrzeni do instalowania zakładów produkujących zielony wodór to jednocześnie obszary, w których problem niedoboru wody staje się coraz bardziej krytyczny. Całkowita roczna zdolność produkcyjna istniejących i działających zakładów produkujących zielony i niebieski wodór na świecie wynosi 1,7 Mt, z czego ok. 12% znajduje się na obszarach o wysokim deficycie wody. Planowane projekty w jeszcze większym stopniu będą narażone na problemy związane z jej niedoborem. Według zapowiedzi do 2030 r. 40% globalnej produkcji wodoru wytwarzanego metodą elektrolizy będzie zlokalizowane w regionach dotkniętych deficytem wody⁴⁵ (rysunek 3).



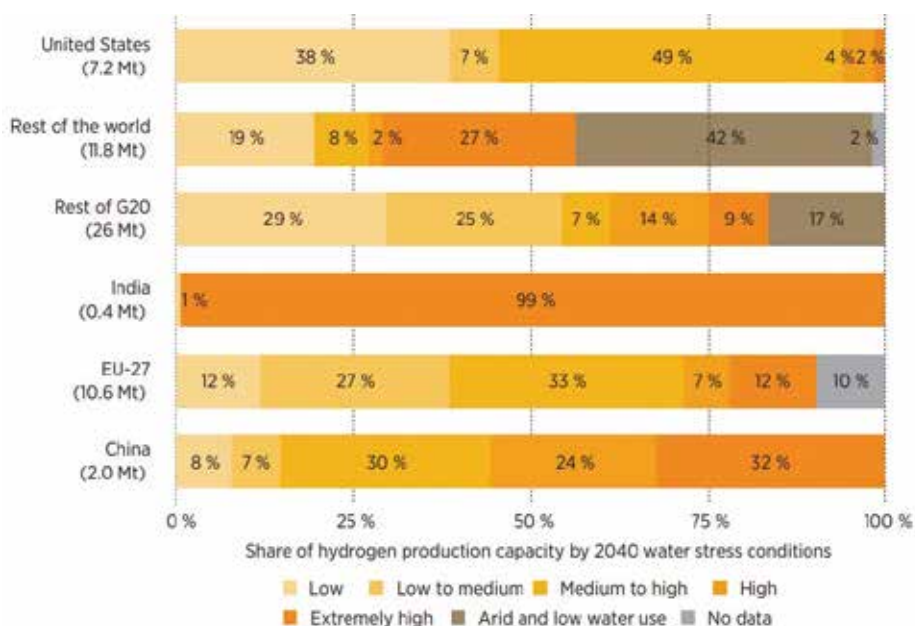
Rysunek 3. Planowane projekty elektrolizerów do produkcji zielonego wodoru oraz poziomy niedoboru wody do 2030 r.

Źródło: International Energy Agency, *Global Hydrogen Review 2024*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf>, s. 91 [dostęp: 16 XI 2024].

⁴⁴ Tamże.

⁴⁵ International Renewable Energy Agency, Bluerisk, *Water for hydrogen production*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Bluerisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf, s. 38 [dostęp: 6 XI 2024].

Znaczna część planowanych mocy w zakresie produkcji zielonego wodoru ma być zlokalizowana w Australii, Europie Zachodniej, Azji Środkowej, Afryce Zachodniej oraz na Bliskim Wschodzie, przy czym wszystkie te regiony, z wyjątkiem Europy Zachodniej, borykają się z umiarkowanym lub wysokim deficytem wody. W Stanach Zjednoczonych projekty związane z produkcją zielonego i niebieskiego wodoru są w niewielkim stopniu narażone na problemy związane z jej niedoborem, jednak w pozostałych krajach G20 oraz w 71% państw reszty świata ponad 40% istniejących i planowanych mocy produkcyjnych znajduje się na obszarach o wysokim deficycie wody. Szczegółowy rozkład globalnych mocy produkcyjnych wodoru, zarówno istniejących, jak i planowanych, w zależności od poziomu niedoboru wody w 2040 r. i regionu, został przedstawiony na wykresie 7.



Wykres 7. Rozkład globalnych mocy produkcyjnych zielonego i niebieskiego wodoru (istniejących i planowanych) według poziomu deficytu wody w 2040 r.

Źródło: International Renewable Energy Agency, Bluerisk, *Water for hydrogen production*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Bluerisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf, s. 41 [dostęp: 6 XI 2024].

Niedobór wody stanowi jedno z największych wyzwań w kontekście rozwoju projektów wodorowych, zarówno w regionach, gdzie dostęp do niej już jest ograniczony, jak i w miejscach, które w przyszłości mogą zostać dotknięte suszami

w wyniku zmian klimatycznych. W celu przezwyciężenia tego problemu realizatorzy projektów wodorowych powinni rozważyć wykorzystanie różnych źródeł wody, tj. wód gruntowych, powierzchniowych, ścieków oraz wody morskiej.

Bardzo obiecującą strategią w obliczu niedoboru zasobów wodnych jest odsalanie wody morskiej. Chociaż wiąże się to z kosztami inwestycyjnymi, to stanowią one stosunkowo niewielką, wynoszącą zazwyczaj poniżej 2%, część całkowitych wydatków ponoszonych na realizację projektów wodorowych. Najczęściej wykorzystywany proces odsalania, jakim jest odwrócona osmoza, potrzebuje ok. 3–6 kWh energii elektrycznej na każdy metr sześcienny wody, co zwiększa koszt produkcji wodoru jedynie o ok. 0,05 dolara/kg⁴⁶.

Warto zaznaczyć, że obecna globalna zdolność produkcyjna zakładów odsalania wynosi ok. 145 mln metrów sześciennych dziennie. Jest to niemal dwukrotny wzrost w porównaniu z rokiem 2010. W 2023 r. instalacje odsalania działały w 45 krajach, m.in. w: Chinach, Arabii Saudyjskiej, Hiszpanii, Zjednoczonych Emiratach Arabskich i Stanach Zjednoczonych. Kraje te odpowiadają za ponad połowę światowej zdolności produkcji odsolonej wody. Szacuje się, że ok. 70% produkcji niskoemisyjnego wodoru planowanej na 2030 r. zostanie zlokalizowane w odległości do 100 km od wybrzeża, co umożliwi wykorzystanie wody morskiej jako głównego źródła. W przypadku projektów bardziej oddalonych od wybrzeża zastosowanie technologii odsalania również jest możliwe, jednak wiąże się z koniecznością budowy kosztownych rurociągów do transportu odsolonej wody⁴⁷.

Innym rozwiązaniem w zakresie oszczędności zasobów wodnych są nowoczesne technologie zarządzania ciepłem w procesach produkcji wodoru. Skuteczne systemy chłodzenia mogą znacznie zmniejszyć zapotrzebowanie na wodę i ograniczyć wpływ na środowisko. Alternatywne technologie chłodzenia, np. chłodzenie suche, systemy zamgławiania, systemy adiabatyczne dla chłodziw powietrznych typu Air Fin oraz systemy chłodziw zamkniętych Tundracel, mają potencjał do zmniejszenia zapotrzebowania na wodę w porównaniu z tradycyjnymi metodami chłodzenia mokrego. Dodatkowo sama poprawa sprawności procesu elektrolizy ma bezpośredni wpływ na zmniejszenie zużycia wody – wzrost wydajności o 1% pozwala obniżyć zużycie wody o ok. 2%. Zastosowanie tych rozwiązań wspiera bardziej efektywną i zrównoważoną produkcję wodoru, co jest szczególnie istotne w regionach borykających się z deficytem zasobów wodnych⁴⁸.

⁴⁶ International Energy Agency, *Global Hydrogen Review 2024...*, s. 89–92.

⁴⁷ Tamże.

⁴⁸ Tamże, s. 93.

Wnioski

Transformacja energetyczna związana z przejściem na czystą energię prowadzi do coraz silniejszych powiązań między minerałami krytycznymi a sektorem energetycznym. Zapotrzebowanie na te surowce ściśle zależy od wykorzystywanej technologii czystej energii. W przypadku elektrolizerów istotną rolę odgrywają takie surowce, jak: nikiel, cyrkon, REEs oraz PGMs. Jednocześnie technologie OZE, niezbędne do produkcji zielonego wodoru, również wymagają podobnych materiałów, w tym niklu i REEs. Co więcej, same technologie OZE konkurują ze sobą o zasoby, takie jak aluminium, miedź czy wspomniane wcześniej REEs i nikiel. Konkurencja o minerały nie wynika bezpośrednio z relacji między OZE a zielonym wodorem, lecz z zapotrzebowania na te same surowce potrzebne do ich rozwoju.

Analiza wykazała, że istnieje wyraźna zależność między produkcją zielonego wodoru, dostępnością minerałów krytycznych a poziomem stresu wodnego w poszczególnych regionach. W regionach bogatych w złoża minerałów krytycznych występuje jednocześnie wysoki poziom stresu wodnego. Prognozy wskazują, że prawie połowa planowanych elektrolizerów do produkcji zielonego wodoru w 2030 r. zostanie zlokalizowana na obszarach dotkniętych niedoborami wody. Wysokie zapotrzebowanie na ultraczystą wodę w procesie elektrolizy, w połączeniu z ograniczonymi zasobami wodnymi, może prowadzić do konkurencji między gospodarką wodorową a gospodarką wodną, a w dłuższej perspektywie – do lokalnych konfliktów o dostęp do wody. Zminimalizowanie tego ryzyka wymaga wprowadzania zintegrowanych polityk dotyczących sektora wodnego i wodorowego, uwzględniających wzajemne zależności między tymi dwoma obszarami.

Wśród rekomendowanych rozwiązań technologicznych warto wymienić odsalanie wody morskiej, zaawansowane systemy chłodzenia, optymalizację procesów elektrolizy oraz recykling minerałów. Ich wdrożenie może znacznie ograniczyć wpływ produkcji wodoru na potrzebne zasoby i pozwolić na zrównoważony rozwój tej technologii. Brak takich rozwiązań może z kolei spowolnić transformację energetyczną, a jednocześnie zwiększyć jej koszty.

Analiza rynku minerałów krytycznych wskazuje na wysoką koncentrację produkcji. Prym wiodą tu Chiny, dominujące również w procesach rafinacji. Asymetrie w produkcji i przetwórstwie minerałów krytycznych mogą stanowić zagrożenie dla stabilności globalnego rynku wodorowego i dostępu do zasobów mineralnych. Koniecznością jest tworzenie zróżnicowanej sieci dostaw tych minerałów oraz rozwijanie rafinacji w innych krajach, aby zmniejszyć ryzyko monopolu. Zwłaszcza kraje importujące, w tym państwa UE i USA, powinny dywersyfikować źródła minerałów oraz rozwijać technologie recyklingu.

Dalsze badania powinny skupić się na opracowaniu wytycznych dla polityk zarządzania gospodarką wodną w regionach dotkniętych deficytem wody w kontekście rozwoju sektora wodorowego. Innym priorytetowym obszarem badań powinna być ocena efektywności i opłacalności alternatywnych technologii oraz rozwój modeli prognostycznych, które uwzględniają zmiany klimatyczne, w tym nasilające się zjawiska suszy, mogące wpłynąć na dostępność zasobów wodnych. Modele te mogłyby wspierać prognozowanie zapotrzebowania na wodę w sektorze wodorowym oraz opracowywanie strategii zarządzania zasobami wodnymi uwzględniających zmiany klimatyczne i rosnące zapotrzebowanie na zielony wodór.

Bibliografia

Calvo G., Mudd G., Valero A., Valero A., *Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality?*, „Resources” 2016, t. 5, nr 4, 36. <https://doi.org/10.3390/resources5040036>.

Depraiter L., Goutte S., *The Role and Challenges of Rare Earths in the Energy Transition*, working papers, SSRN, 23 VI 2023 r. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4477111>.

European Commission, *Critical raw materials for the EU*, Brussels 2010.

Greenwald J.E., Zhao M., Wicks D.A., *Critical mineral demands may limit scaling of green hydrogen production*, „Frontiers in Geochemistry” 2023, t. 1. <https://doi.org/10.3389/fgeo-2023.1328384>.

Kalantzakos S., *The Race for Critical Minerals in an Era of Geopolitical Realignments*, „The International Spectator” 2020, t. 55, nr 3. <https://doi.org/10.1080/03932729.2020.1786926>.

Moreira S., Laing T., *Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen*, Washington 2022.

National Research Council, *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, Washington 2008. <https://doi.org/10.17226/12034>.

Noailly J., Bauer Ch., Haller T., Hool A., *The role of critical materials for the energy transition. Challenges and opportunities*, „Swiss Academies Reports” 2024, t. 19, nr 3, s. 5–6. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12168441>.

Sengupta M., *Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration, and control*, wyd. 2, CRC Press 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003164012>.

U.S. Department of Energy, *A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals*, Washington 2018.

U.S. Department of Energy, *Critical Materials Strategy*, Washington 2010.

U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2024*. <https://doi.org/10.3133/mcs2024>.

Źródła internetowe

Bosse P., Gourdon J., Lapeyronie H., Normand E., *The minerals essential to the energy and digital transitions: An opportunity for Africa?*, Agence Française de Développement, <https://www.afd.fr/en/ressources/minerals-essential-energy-and-digital-transitions-opportunity-africa> [dostęp: 14 V 2024].

European Patent Office, International Renewable Energy Agency, *Patent insight report: Innovation trends in electrolyzers for hydrogen production*, https://link.epo.org/web/patent_insight_report_innovation_trends_for_electrolyzers_in_hydrogen_production_en.pdf [dostęp: 14 XI 2024].

Hendriwardani M., Ramdoo I., *Critical Minerals: A primer*, <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2022/11/critical-minerals-primer-en-WEB.pdf> [dostęp: 13 XI 2024].

International Energy Agency, *Critical Minerals Market Review 2023*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c7716240-ab4f-4f5d-b138-291e76c6a7c7/CriticalMineralsMarketReview2023.pdf> [dostęp: 15 V 2024].

International Energy Agency, *Global Hydrogen Review 2024*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf> [dostęp: 16 XI 2024].

International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf> [dostęp: 14 V 2024].

International Renewable Energy Agency, Bluerisk, *Water for hydrogen production*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Bluerisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf [dostęp: 6 XI 2024].

International Renewable Energy Agency, *Green Hydrogen: A guide to policy making*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf [dostęp: 12 V 2024].

International Renewable Energy Agency, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf [dostęp: 13 V 2024].

Kaboli E., *Critical Minerals and Materials for Selected Energy Technologies*, Congressional Research Service, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R48149> [dostęp: 12 XI 2024].

Lakshman S., *More Critical Minerals Mining Could Strain Water Supplies in Stressed Regions*, World Resources Institute, 10 I 2024 r., <https://www.wri.org/insights/critical-minerals-mining-water-impacts> [dostęp: 13 V 2024].

Mo Ibrahim Foundation, *Africa's critical minerals: Africa at the heart of a low-carbon future*, <https://mo.ibrahim.foundation/sites/default/files/2022-11/minerals-resource-governance.pdf> [dostęp: 14 V 2024].

Morrison W.M., Tang R., *China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States*, Washington 2012, <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc85418/> [dostęp: 12 XI 2024].

Snoussi-Mimouni M., Avérous S., *High demand for energy-related critical minerals creates supply chain pressures*, World Trade Organization, 10 I 2024 r., https://www.wto.org/english/blogs_e/data_blog_e/blog_dta_10jan24_e.htm [dostęp: 12 V 2024].

U.S. Department of Energy, *Critical Materials Assessment 2023*, „Federal Register” 2024, t. 88, nr 149, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2023-08-04/pdf/2023-16611.pdf> [dostęp: 16 XI 2024].

U.S. Department of Energy, *What Are Critical Materials and Critical Minerals?*, <https://www.energy.gov/cmm/what-are-critical-materials-and-critical-minerals> [dostęp: 10 V 2024].

Zilli R., André J., Bellucci S., *Policy analysis: Securing sustainable critical raw material supply for clean energy in Europe*, European Energy Research Alliance 2023, https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=1235:EERA_Policy_Analysis_on_Critical_Raw_Materials_Layout_Digital-for-publication [dostęp: 13 V 2024].

Marta Grzywacz

Ukończyła ekonomię na Uniwersytecie Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie. Obecnie studentka Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska na Uniwersytecie Warszawskim, prowadzonych przez Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Zrównoważonym Rozwojem.

Kontakt: martagrzywacz8@gmail.com