



Techniki elektrowydzielania w odzysku surowców krytycznych z odpadów elektrycznych i elektronicznych – przegląd i analiza literatury

Electrodeposition techniques for the recovery of critical raw materials from electrical and electronic waste – review and literature analysis

Maciej Dańczak¹, Agnieszka Sobianowska-Turek^{1*} 

¹ Katedra Gospodarki Wodno-Ściekowej i Technologii Odpadów, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Wrocławska

* Kontakt / Correspondence: agnieszka.sobianowska-turek@pwr.edu.pl

Streszczenie:

W artykule dokonano przeglądu wybranych metod elektrochemicznych odzysku metali z odpadów polimetalicznych, z naciskiem na surowce krytyczne w sprzęcie elektrycznym i elektronicznym. Omówiono elektrowydzielanie metali i wpływ potencjału redukcyjnego na możliwość prowadzenia procesów oraz selektywność odzysku. Scharakteryzowano elektrodpozycję, elektrosorpcję, elektrodializę, elektrokoagulację oraz elektrolizę zawiesinową. Wskazano kierunki integracji z OZE oraz możliwość zastosowania rozpuszczalników eutektycznych jako alternatywy dla silnie kwaśnych elektrolitów. Metody elektrochemiczne stanowią kierunek rozwoju technologii recyklingu, zgodny z założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego zarządzania zasobami.

Słowa kluczowe: elektrowydzielanie, elektrochemia, recykling, odpady elektroniczne, surowce krytyczne

Abstract:

This article reviews selected electrochemical methods of metals recovery from polymetallic waste, with emphasis on critical raw materials in waste electrical and electronic equipment. The metal electrodeposition is discussed, highlighting the influence of reduction potential on process feasibility and recovery selectivity. The electrochemical techniques are characterized: electrodeposition, electrosorption, electrodialysis, electrocoagulation and slurry electrolysis. Potential pathways for RES integrating are proposed, along with the use of eutectic solvents as an alternative to strongly acidic electrolytes. Electrochemical methods represent a promising direction for the development of recycling technologies, consistent with the principles of the circular economy and sustainable resource management.

Keywords: electrowinning, electrochemistry, recycling, electronic waste, critical raw materials

1. Wprowadzenie

Nieustający postęp techniczny we współczesnym świecie, napędzany dynamicznym rozwojem zaawansowanych technologii, w coraz większym stopniu kształtuje funkcjonowanie globalnej gospodarki surowców krytycznych. Surowce te stanowią fundament rozwoju nowoczesnych gałęzi przemysłu, ponieważ dzięki swoim unikatowym właściwościom fizycznym i chemicznym są wykorzystywane jako niezbędne komponenty w produkcji zaawansowanych urządzeń, systemów energetycznych, elektroniki, technologii informatycznych oraz rozwiązań wspierających transformację energetyczną [1].

Jednocześnie zasoby te charakteryzują się ograniczonym występowaniem w środowisku naturalnym, co skutkuje relatywnie

niski poziom wydobycia ze złóż pierwotnych. Nierównomierne, często silnie rozproszone rozmieszczenie złóż dodatkowo powoduje, że ich eksploatacja jest skoncentrowana jedynie w wybranych regionach. W konsekwencji globalny rynek wydobycia i eksportu surowców krytycznych pozostaje zdominowany przez niewielką liczbę państw dysponujących najbogatszymi lub najbardziej opłacalnymi złóżami. Taka koncentracja produkcji oraz handlu prowadzi do zwiększenia podatności światowych łańcuchów dostaw na zakłócenia o charakterze gospodarczym, politycznym i geopolitycznym. Ograniczona liczba dostawców, niestabilność regionów wydobywczych oraz możliwość wprowadzania restrykcji eksportowych przez państwa dominujące na rynku stwarzają realne zagrożenie dla bezpieczeństwa, stabilności oraz ciągłości dostaw [2].

Jednym ze sposobów ograniczenia ryzyka niedoboru surowców krytycznych jest rozwój technologii recyklingu. Proces ten umożliwia odzysk i ponowne wykorzystanie surowców z różnych strumieni odpadów, w szczególności ze zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEiE). Zamiast kierować tego rodzaju odpady na składowiska, mogą one być przetwarzane w wyspecjalizowanych zakładach, sprzyjając efektywnemu wykorzystaniu zasobów oraz wpisując się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym. Tradycyjne metody odzysku, takie jak pirometalurgia i hydrometalurgia, mimo wysokiej skuteczności, mogą negatywnie wpływać na środowisko ze względu na znaczne zużycie odczynników chemicznych oraz emisję szkodliwych gazów. Alternatywę stanowią procesy elektrochemiczne, które wykorzystują energię elektryczną do selektywnego odzysku surowców. Ich wdrożenie w skali przemysłowej może istotnie zwiększyć poziom recyklingu surowców krytycznych, jednocześnie ograniczając ilość odpadów kierowanych na składowiska [3].

2. Strumień odpadów

Strumień zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEiE) jest jednym z najbogatszych źródeł surowców krytycznych, a jego ilość w skali światowej systematycznie rośnie. Zgodnie z raportem Global E-Waste Monitor 2024, w 2022 roku wygenerowano 62 miliony ton ZSEiE, co stanowi wzrost o ponad 80% w porównaniu z rokiem 2010. Prognozy wskazują dalszy wzrost o około 30% do 2030 roku, co oznacza, że wówczas powstanie aż 82 miliony ton odpadów elektrycznych i elektronicznych na całym świecie [4]. Również dla Polski możliwe jest określenie ilości powstającego ZSEiE na podstawie raportu Głównego Urzędu Statystycznego z 2024 roku dotyczącego Ochrony Środowiska. W 2022 roku do obrotu wprowadzono łącznie 1,3 miliona ton sprzętu elektronicznego różnej wielkości, jednakże jedynie 488 tysięcy ton zostało odebranych jako odpady, w tym 399 tysięcy ton pochodzących z gospodarstw domowych. Dane te wskazują na znaczną dysproporcję między ilością wprowadzanego sprzętu a faktycznie zbieranymi odpadami, co podkreśla potrzebę rozwoju efektywnych systemów zbiórki i recyklingu [5].

W ujęciu masowym strumienia ZSEiE dominują urządzenia wielkogabarytowe, które stanowią średnio 40–50% jego całkowitej masy [6]. Urządzenia małogabarytowe oraz sprzęt technologii informacyjnych i komunikacyjnych odpowiadają natomiast za około 20–25% masy strumienia. Pomimo wyraźnie mniejszego udziału masowego, to właśnie ta grupa urządzeń charakteryzuje się znacznie większym potencjałem recyklingowym. Jest to efektem wysokiej zawartości surowców krytycznych, wynikającej ze złożonej struktury [7]. Miniaturyzacja elementów, takich jak układy scalone czy płytki drukowane, wymaga zastosowania wyjątkowych właściwości materiałów, które zapewniają prawidłowe funkcjonowanie urządzeń elektronicznych. Szczególnie istotną rolę odgrywają płytki drukowane wraz z zamontowanymi na ich powierzchni elementami, zawierającymi znaczące ilości metali zarówno podstawowych, jak i szlachetnych. Choć płytki drukowane stanowią jedynie niewielki procent masy całkowitej strumienia odpadów, reprezentują one jednocześnie najbardziej zasobną pod względem surowcowym frakcję. Płytki drukowane są elementem stosunkowo lekkim i odpowiada za niewielki udział masowy całego urządzenia, jednak jej wartość

materiałowa jest nieproporcjonalnie wysoka [8].

Płytki drukowane są standardowym elementem urządzeń elektronicznych i pełnią funkcję „układu nerwowego”, odpowiadając za przesyłanie sygnałów oraz energii elektrycznej pomiędzy poszczególnymi podzespołami. Konstrukcja płytki składa się z wielowarstwowych kompozytów, łączących materiały niemetaliczne z metalicznymi. Metale wykorzystywane są głównie w postaci ścieżek przewodzących, zapewniających połączenia elektryczne pomiędzy elementami umieszczonymi na powierzchni płytki. Szacuje się, że jedna tona zużytych płytek PCB może zawierać nawet do 250 g złota, 1000 g srebra oraz 50 g palladu, co czyni je znacznie bogatszym źródłem surowców niż wiele naturalnie występujących rud kopalin [9].

3. Procesy poprzedzające odzysk metali metodami elektrowydzielania

Nieodłącznym elementem płytek drukowanych są komponenty montowane na ich powierzchni, dlatego ich odpowiednie przetwarzanie umożliwia osiągnięcie wysokiego poziomu recyklingu oraz odzysku surowców. Procesy przygotowawcze poprzedzające elektrochemiczny odzysk metali można zasadniczo podzielić na dwa główne podejścia: mechaniczne przetwarzanie połączone z procesami hydrometalurgicznymi oraz pirometalurgię połączoną z hydrometalurgią. Niezależnie od przyjętego łańcucha technologicznego, etapem wstępnym jest zawsze wymontowanie płytki drukowanej z urządzenia elektronicznego [10].

Mechaniczna obróbka płytek drukowanych może być przeprowadzana w sposób mniej lub bardziej zaawansowany. W zakładach o niższym stopniu zaawansowania proces ten często opiera się na ręcznym demontażu elementów montowanych powierzchniowo. Z kolei w nowoczesnych instalacjach stosuje się zautomatyzowane metody separacji, wykorzystujące procesy termiczne lub mechaniczne, często realizowane z użyciem robotów przemysłowych. W przypadku separacji termicznej cała wymontowana płytka jest podgrzewana do temperatury 250–350°C, co prowadzi do stopienia spoiwa lutowniczego i uwolnienia elementów powierzchniowych od części organicznej [11].

Procesy pirometalurgiczne polegają na wysokotemperaturowym przetwarzaniu frakcji wsadowej w celu otrzymania półproduktów lub produktów umożliwiających dalszy odzysk surowców. Ich głównym celem jest usunięcie frakcji organicznej i skoncentrowanie części metalicznej, dlatego metody te zazwyczaj nie wymagają skomplikowanej, wstępnej obróbki mechanicznej. Pirometalurgiczne przetwarzanie płytek drukowanych można podzielić na cztery podstawowe techniki: pirolizę, zgazowanie, wytapianie oraz spalanie. Każda z tych metod prowadzona jest w odmiennych warunkach i pozwala na uzyskanie różnych półproduktów [12].

Hydrometalurgia stanowi końcowy etap przygotowania materiału przed zastosowaniem metod elektrochemicznych, wykorzystujących energię elektryczną do wydzielania metali. Proces ten polega na ługowaniu, czyli przeprowadzeniu części metalicznej z fazy stałej do fazy ciekłej w postaci jonów, tworząc roztwór elektrolityczny. Roztwory ługujące uzyskuje się najczęściej przy użyciu kwasów, w szczególności kwasu siarkowego (VI), kwasu azotowego (V), lub zasad. W celu zapewnienia optymalnych warunków procesu oraz zwiększenia jego efektywności, płytki dru-

owane poddaje się wcześniejszemu rozdrobnieniu przed wprowadzeniem do roztworu ługującego. Pozwala to na zwiększenie powierzchni kontaktu faz, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów procesu i skróceniu czasu ługowania [13]. Dobór odpowiedniego rozpuszczalnika uzależniony jest od rodzaju odzyskiwanego surowca. Roztwory kwasowe stosowane są głównie do ługowania metali nieszlachetnych, natomiast metale półszlachetne i szlachetne często wymagają zastosowania dodatkowych utleniaczy. Przykładowo miedź, ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne zaliczana jest do metali półszlachetnych. Aby uzyskać wysoki stopień przejścia do roztworu jonowego, miedź może być ługowana w obecności nadtlenu wodoru, który pełni rolę skutecznego utleniacza [10].

4. Omówienie wybranych metody elektrowydzielania

Elektrowydzielanie jest procesem elektrochemicznym prowadzonym w układzie ogniwa elektrolitycznego, którego podstawowymi elementami są anoda, katoda oraz roztwór elektrolityczny. Siłą napędową procesu jest przepływ energii elektrycznej przez elektrolit otrzymany w wyniku wcześniejszych procesów ługowania hydrometalurgicznego. Roztwór ten zawiera rozpuszczone jony metali, które na powierzchni katody ulegają redukcji, umożliwiając otrzymanie surowca w postaci metalicznej. Wydzielanie metalu jest tym łatwiejsze, im jego potencjał redukcyjny jest bliższy umownemu zeru skali potencjałów elektrochemicznych, wyznaczanemu przez standardową elektrodę wodorową, której potencjał wynosi $4,44 \pm 0,02$ V w temperaturze 25°C. Istotną zaletą elektrowydzielania jest możliwość selektywnego odzysku oraz rafinacji metali z roztworów pochodzących z przetwarzania odpadów polimetalicznych. Odpowiednie dostosowanie parametrów procesu, takich jak gęstość prądu, skład chemiczny i pH elektrolitu oraz rodzaj i właściwości materiałów elektrodowych, umożliwia selektywne wydzielanie określonego surowca [14].

Metody elektrochemicznego wydzielania metali obejmują kilka podtypów, różniących się modyfikacją podstawowego schematu procesu w celu zwiększenia selektywności i efektywności odzysku. Do najczęściej wyróżnianych należą: elektrodpozycja, elektrosorpcja, elektrodializa, elektrokoagulacja oraz elektroliza szlamów powstających po procesach elektrowydzielania.

4.1. Elektrodpozycja

Elektrodpozycja jest jedną z najpowszechniej stosowanych i najdłużej rozwijanych metod elektrochemicznego wydzielania metali. Proces ten polega na redukcji dodatnio naładowanych jonów metali na powierzchni katody, w wyniku czego przechodzą one ze stanu jonowego do postaci metalicznej. Jednocześnie elektrodpozycja należy do najprostszych technicznie metod elektrowydzielania, gdyż może być prowadzona w klasycznym, nieskomplikowanym reaktorze elektrochemicznym. Prostota układu technologicznego, w połączeniu z możliwością efektywnego odzysku metali o wysokiej czystości, sprawia, że metoda ta znajduje szerokie zastosowanie zarówno w przemyśle, jak i w badaniach naukowych [15]. Pierwsze intensywne badania nad elektrodpozycją metali rozpoczęto w latach siedemdziesiątych XX wieku. Początkowo koncentrowano się na metalach charakteryzujących się dodatnim potencjałem redukcyjnym,

w szczególności na miedzi i srebrze. Dodatnia wartość potencjału umożliwiała prowadzenie procesu w środowisku wodnym, przy zachowaniu stabilności elektrochemicznej wody. Praca w tym zakresie potencjałów ograniczała występowanie niepożądanych reakcji ubocznych, takich jak wydzielanie wodoru lub tlenu, które mogłyby prowadzić do pogorszenia jakości wydzielanego surowca. Jednocześnie zwiększało to bezpieczeństwo eksploatacyjne oraz stabilność procesu [16].

Wydzielanie niektórych metali jest jednak utrudnione ze względu na ich potencjały redukcyjne. Metale o skrajnie dodatnich lub ujemnych wartościach potencjału wymagają prowadzenia procesu poza optymalnym zakresem stabilności elektrochemicznej elektrolitu, co ogranicza efektywność i selektywność odzysku. Dodatkowo metale o zbliżonych potencjałach redukcyjnych mogą ulegać współosadzaniu na powierzchni elektrody, prowadząc do obniżenia czystości produktu końcowego. Przykładem takiego układu jest mieszanina kobaltu (-0,28 V) i niklu (-0,257 V), dla której selektywne wydzielanie ze wspólnego roztworu jest utrudnione ze względu na podobieństwo właściwości elektrochemicznych. Selektywność procesu można jednak zwiększyć, stosując modyfikację powierzchni katody poprzez jej wstępne pokrycie cienką warstwą kobaltu. Sprzyja to osadzaniu się jonów tego metalu, obniżając wymagany potencjał redukcyjny o około 200 mV i zwiększając różnicę potencjałów pomiędzy poszczególnymi składnikami roztworu [16].

4.2. Elektrosorpcja

Elektrosorpcja jest procesem adsorpcji jonów lub koloidów wspomaganą działaniem pola elektrycznego. Naładowane cząstki przemieszczają się w roztworze w kierunku elektrody o przeciwnym znaku ładunku, gdzie ulegają separacji z fazy ciekłej. Podstawą tego procesu jest dejonizacja pojemnościowa, w której jony gromadzone są w podwójnej warstwie elektrycznej pod wpływem sił elektrostatycznych. Mechanizm ten charakteryzuje się jednak stosunkowo niską selektywnością, którą można zwiększyć poprzez zastosowanie membran jonoselektywnych, prowadząc do procesu membranowej dejonizacji pojemnościowej. Należy podkreślić, że w elektrosorpcji nie zachodzi bezpośredni transfer elektronów pomiędzy elektrodą a elektrolitem [16].

W przypadku elektrod wykonanych z silnie porowatego węglu aktywnego obserwuje się preferencyjne usuwanie kationów dwuwartościowych w porównaniu do jednowartościowych, co wynika z relacji pomiędzy rozmiarem jonów a wielkością porów elektrody. Wzrost przyłożonego potencjału sprzyja nasileniu tych efektów i zwiększeniu selektywności jonowej. Dodatkowo selektywność można poprawić poprzez modyfikację chemiczną powierzchni elektrody, na przykład przez wprowadzenie ujemnie naładowanych grup karboksylowych, uzyskiwanych w wyniku utleniania elektrody kwasem azotowym. Alternatywnym sposobem zwiększenia selektywności procesu jest modyfikacja wielkości oraz rozkładu porów na powierzchni elektrody. Regulacja struktury porowatej realizowana jest poprzez proces aktywacji prowadzony w reaktorze w atmosferze CO₂, w temperaturze 950°C. Zastosowane warunki aktywacji mają bezpośredni wpływ na charakterystykę otrzymanej elektrody. Elektrody o niskim stopniu aktywacji charakteryzują się przewagą porów o mniejszych średnicach oraz niewielką utratą masy w trakcie

etapu przygotowawczego. Z kolei elektrody o wysokim stopniu aktywacji posiadają większy udział porów o dużych rozmiarach, czemu towarzyszy wyraźnie większa utrata masy materiału [16].

Proces elektrosorpcji może zachodzić również poprzez interkalację jonów w wolne przestrzenie sieci krystalicznej elektrody. Pod wpływem przepływu elektronów jony są wbudowywane w strukturę krystaliczną materiału elektrodowego, a następnie uwalniane podczas etapu rozładowywania elektrody [17].

4.3. Elektrodializa

Elektrodializa jest procesem separacji jonów z roztworów elektrolitycznych, w którym siłę napędową stanowi przyłożony potencjał elektrochemiczny. Nieodłącznym elementem układu są membrany jonowymienne jedno- lub dwubiegunowe. W konwencjonalnych systemach stosuje się membrany kationowymienne zawierające ugrupowania o ładunku ujemnym, takie jak grupy sulfonianowe lub karboksylanowe, oraz membrany anionowymienne z ugrupowaniami o ładunku dodatnim, najczęściej trzeciorzędowymi lub czwartorzędowymi grupami aminowymi. Na efektywność i selektywność procesu wpływają właściwości membran, skład i stężenie roztworu oraz warunki prowadzenia procesu elektrochemicznego [16].

Nowoczesne rozwiązania coraz częściej wykorzystują układy hybrydowe oraz zaawansowane materiały membranowe. Przykładem jest hybrydowa elektrodializa z zastosowaniem rozpuszczalników głęboko eutektycznych, umożliwiającą skuteczną separację wolframu i arsenu. Rozpuszczalniki te, będące mieszaninami dwóch lub więcej związków chemicznych, charakteryzują się nowymi często korzystniejszymi właściwościami fizykochemicznymi w porównaniu do ich składników, niską toksycznością i dobrą biodegradowalnością, co czyni je rozwiązaniem bardziej przyjaznym środowisku w porównaniu z klasycznymi rozpuszczalnikami [18].

4.4. Elektrokoagulacja

Elektrokoagulacja polega na wytwarzaniu koagulantów in situ w wyniku elektrochemicznego utleniania anody protektorowej, najczęściej wykonanej z żelaza lub aluminium. Reakcje anodowe prowadzą do powstawania kationów tych metali przechodzących do roztworu oraz do utleniania wody z wydzielaniem tlenu. Równocześnie na katodzie zachodzi redukcja wody z wytworzeniem wodoru i jonów wodorotlenkowych, a w pewnych warunkach także redukcja jonów metali obecnych w elektrolicie. Powstałe kationy metali ulegają hydrolizie, tworząc wodorotlenki i polimerowe kompleksy hydroksylowe, których charakter zależy od pH roztworu. Związki te koagulują zanieczyszczenia, prowadząc do ich strącania, a wydzielające się gazy sprzyjają flotacji osadów [19].

Pomimo licznych zalet elektrokoagulacji, takich jak wysoka skuteczność usuwania zanieczyszczeń, prosta aparatura i łatwość obsługi, jej istotnym ograniczeniem jest brak selektywności w przypadku obecności wielu metali w roztworze. Dodatkowym problemem jest powstawanie osadów wodorotlenkowych, co wymaga wprowadzenia kolejnych etapów separacji metali. Z tego względu elektrokoagulacja znajduje zastosowanie głównie jako metoda oczyszczania roztworów, a nie selektywnego odzysku metali [16].

4.5. Elektroliza zawieszinowa

Elektroliza zawieszinowa stanowi odmienną metodę elektrowydzielania w porównaniu do klasycznych procesów prowadzonych z roztworów elektrolitycznych otrzymywanych w wyniku sekwencyjnego zastosowania procesów pirometalurgicznych i hydrometalurgicznych. Jej istotną cechą jest integracja etapów ługowania oraz elektrowydzielania w ramach jednego procesu technologicznego. Proces ten może być realizowany w warunkach temperatury pokojowej oraz przy ciśnieniu atmosferycznym, co przekłada się na redukcję kosztów eksploatacyjnych. W trakcie elektrolizy do medium wprowadzane są sproszkowane płytki drukowane, tworzące heterogeniczny układ zawieszinowy. Częstki fazy stałej ulegają elektrochemicznemu utlenianiu na anodzie, natomiast na katodzie zachodzi selektywne osadzanie metali. Specyfika elektrolizy zawieszinowej umożliwia również łatwe zastosowanie odnawialnych źródeł energii jako źródła zasilania, co zwiększa środowiskową atrakcyjność tej metody w porównaniu z innymi technikami odzysku metali [20].

Pomimo prostoty prowadzenia procesu oraz umiarkowanych wymagań, konwencjonalna elektroliza zawieszinowa prowadzona jest zazwyczaj w środowisku silnie kwaśnym, niezbędnym do efektywnego wydzielania metali. Obecność kwasu ogranicza wytrącanie jonów metali w postaci elektrochemicznie nieaktywnych wodorotlenków, jednak jednocześnie wymusza stosowanie elektrod wykonanych z metali szlachetnych lub materiałów powlekanych. Stanowi to istotne obciążenie ekonomiczne procesu recyklingu. Jednym z podejść pozwalających na ograniczenie stosowania silnych kwasów jest prowadzenie elektrolizy zawieszinowej z wykorzystaniem rozpuszczalników głęboko eutektycznych [20].

5. Podsumowanie

Metody elektrochemiczne mogą stanowić istotne uzupełnienie, a w wybranych zastosowaniach również alternatywę, dla konwencjonalnych technologii recyklingu odpadów polimetalicznych, w tym ZSEiE. Szczególnie istotna jest ich wysoka selektywność oraz możliwość odzysku surowców krytycznych z frakcji o niskim udziale masowym, lecz wysokiej wartości materiałowej.

Pomimo ograniczonego stopnia wdrożeń przemysłowych, potencjał dalszego rozwoju tych technologii jest znaczący. Kierunki przyszłych prac powinny koncentrować się na optymalizacji parametrów procesowych, zwiększaniu selektywności wydzielania metali oraz ograniczaniu oddziaływania środowiskowego, m.in. poprzez integrację procesów elektrowydzielania z odnawialnymi źródłami energii. Takie podejście wpisuje się bezpośrednio w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym oraz długoterminowe strategie bezpieczeństwa surowcowego.

6. Literatura

- [1] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2024, 29 kwietnia). *Nowe rozporządzenie UE dot. surowców krytycznych – baze informacyjne i cele, zaproszenie na spotkanie informacyjne dot. projektów strategicznych oraz na konsultacje dla przedsiębiorców*. Dostęp online: <https://www.gov.pl/web/klimat/nowe-rozporzadzenie-ue-dot-surowcow-krytycznych>
- [2] International trade in critical raw materials. (2024). *Eurostat*. Dostęp online: <https://ec.europa.eu/eurostat/sta>

- tistics-explained/index.php?title=International_trade_in_critical_raw_materials (dostęp: 25 stycznia 2026).
- [3] Bhoi N. K., Patel M., Kamarapu S. K., Kushwaha P. (2025). Advancing sustainable electronic waste management: An overview of mechatronics solutions for health, environment, and recycling. *Chemosphere*, 383.
 - [4] The Global E-waste Monitor 2024. (2024). *UNITAR*. <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/> (dostęp 25 stycznia 2026).
 - [5] Ochrona środowiska 2024. (2024). *Główny Urząd Statystyczny*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/srodowisko/ochrona-srodowiska-2024,1,25.html> (dostęp 25 stycznia 2026).
 - [6] Chicardi E., Lopez-Paneque A., García-Orta V. H. G., Ferrer R. S., Gallardo J. M. (2025). Enrichment Methods for Metal Recovery from Waste from Electrical and Electronic Equipment: A Brief Review. *Metals*, 2. <https://doi.org/10.3390/met15020140>
 - [7] Hao J., Wang Y., Wu Y., Guo F. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. *Resources, Conservation and Recycling* 157, 104787. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>
 - [8] Fornalczyk, A., Willner, J., Francuz, K., & Cebulski, J. (2013). E-waste as a source of valuable metals. *Archives of Materials Science and Engineering*, 63(2), 87–92.
 - [9] Cui J., Zhang L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158(2–3): 228–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.001>
 - [10] Wu C., Awasthi A. K., Qin W., Wei Liu W., Yang C. (2022). Recycling value materials from waste PCBs focus on electronic components: Technologies, obstruction and prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(5): 2213–3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108516>
 - [11] Understanding PCB Recycling. (2023). *Genox Technology*. https://www.genoxtech.com/en/news_i_understanding-pcb-recycling.html (dostęp 25 stycznia 2026). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
 - [12] Gurgul A., Szczepaniak W., Zabłocka-Malicka M. (2018). Incineration and pyrolysis vs. steam gasification of electronic waste. *Science of The Total Environment*, 624: 1119–1124. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.151>
 - [13] Udayakumar S., Muhammad Irfan Bin Abd Razak, Ismail S. (2022). Recovering valuable metals from Waste Printed Circuit Boards (WPCB): A short review. *Materials Today: Proceedings*, 66(5): 3062–3070. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.364>
 - [14] Fathima A., Tang J. Y. B., Giannis A., Ilankoon I. M. S. K., Chong M. N. (2022). Catalysing electrowinning of copper from E-waste: A critical review. *Chemosphere*, 298, 134340. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134340>
 - [15] Chen J. P., Lim L. L. (2005). Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. *Chemosphere*, 60(10): 1384–1392. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.001>
 - [16] Kim K., Candeago R., Rim G., Raymond D., Park A. A., Su X. (2021). Electrochemical approaches for selective recovery of critical elements in hydrometallurgical processes of complex feedstocks. *iScience*, 24 (5): 102374. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102374>
 - [17] Kim S., Kim J., Kim S., Lee J., Yoon J. (2018). Electrochemical lithium recovery and organic pollutant removal from industrial wastewater of a battery recycling plant. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 4(2): 175–182. <https://doi.org/10.1039/C7EW00454K>
 - [18] Almeida J., Craveiro R., Faria P., Silva A. S., Mateus E. P., Barreiros S., Paiva A., Ribeiro A. B. (2020). Electrodialytic removal of tungsten and arsenic from secondary mine resources — Deep eutectic solvents enhancement. *Science of The Total Environment*, 710, 136364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136364>
 - [19] Mohammad Y. A. Mollah, Paul Morkovsky, Jewel A. G. Gomes, Mehmet Kesmez, Jose Parga, David L. Cocke. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114 (1-3): 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
 - [20] Liu K., Huang S., Jin Y., Ma L., Wang W-X., Lam J. C. (2022). A green slurry electrolysis to recover valuable metals from waste printed circuit board (WPCB) in recyclable pH-neutral ethylene glycol. *Journal of Hazardous Materials*, 433. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128702>