

*Innovative strategies for recovering critical metals from e-waste
– from material research analysis to implementation in the circular economy*

Innowacyjne strategie odzysku metali krytycznych z elektroodpadów – od badań materiału do wdrożeń w gospodarce o obiegu zamkniętym



DOI: 10.15199/62.2026.5.3

Hydrometallurgical and electrochem. recovery of metals from printed circuit board (PCB) waste and end-of-life mobile phones was studied. The developed processes included thermal pre-treatment, multi-stage leaching using HNO_3 - and H_2SO_4 -based solns., and electrochem. recovery at laboratory and large-laboratory scales. For PCB waste, leaching efficiencies close to 100% (Cu, Ag) were achieved at laboratory scale and approx. 90% (Cu) and nearly 100% (Ag) at large-laboratory scale. Electrochem. recovery efficiency reached 90–95% for Cu and approx. 80% for Ag. In the case of mobile phones, leaching efficiencies were 96–99% (Cu, Ag) and 43% (Au), while electrochem. recovery reached 99% (Cu, Ag) and 62% (Au). High-purity metals (Cu up to 99%, Ag \geq 99.9%) and metallic composites (AgSnSb, CuAu) were obtained. The results confirm the scalability and industrial potential of the proposed approach.

Keywords: PCB, e-waste, hydrometallurgy, pulsed electrolysis, copper, silver, gold, recycling

Przedstawiono wyniki badań nad hydrometalurgicznym i elektrochemicznym odzyskiem metali z odpadowych płytek drukowanych (PCB) oraz zużytych telefonów przenośnych. Badania obejmowały etap obróbki wstępnej (prażenie), wieloetapowe ługowanie roztworami na bazie HNO_3 i H_2SO_4 oraz odzysk elektrochemiczny w skali laboratoryjnej i wielkolaboratoryjnej. W przypadku odpadów PCB uzyskano efektywność ługowania bliską 100% (Cu, Ag) w skali laboratoryjnej oraz ok. 90% (Cu) i ok. 100% (Ag) w skali wielkolaboratoryjnej. Sprawność odzysku elektrochemicznego wynosiła 90–95% dla Cu oraz ok. 80% dla Ag. W przypadku zużytych telefonów komórkowych efektywność ługowania wynosiła 96–99% (Cu, Ag) oraz 43% (Au), przy sprawności odzysku elektrochemicznego 99% (Cu, Ag) i 62% (Au). Otrzymano metale o wysokiej czystości (Cu do 99%, Ag \geq 99,9%) oraz kompozyty metaliczne AgSnSb i CuAu. Wyniki potwierdzają możliwość skalowania procesów oraz ich potencjał wdrożeniowy w sektorze recyklingu elektroodpadów.

Słowa kluczowe: PCB, elektroodpady, hydrometalurgia, elektroliza pulsowa, miedź, srebro, złoto, recykling

Dynamiczny rozwój technologii elektronicznych oraz systematyczne skracanie cyklu użytkowania produkowanych urządzeń prowadzą do gwałtownego wzrostu ilości zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego WEEE (*waste electrical and electronic equipment*), którego zagospodarowanie stanowi jedno z kluczowych wyzwań

środowiskowych i surowcowych XXI w.¹⁾. Konieczność racjonalnego kształtowania środowiska i gospodarowania jego zasobami zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju (stanowiącego podstawę budowania gospodarki o obiegu zamkniętym^{2–5)}) wymaga przyspieszenia rozwoju recyklingu i odzysku materiałowego w celu zmniejszenia zużycia



Dr inż. Katarzyna SKRZYPCZYŃSKA (ORCID: 0000-0001-8968-1559) w roku 2019 ukończyła studia doktoranckie na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Obecnie pełni funkcję kierownika Sekcji Procesów Elektrochemicznych w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie. Jest autorką i współautorką kilkunastu publikacji naukowych oraz kierownikiem kilku projektów badawczo-rozwojowych w dziedzinie recyklingu i odzysku surowców. Jej działalność zawodowa koncentruje się na opracowywaniu i wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań procesowych dla przemysłu. Specjalność – zagadnienia związane z procesami elektrochemicznymi oraz technologiami recyklingu.



Dr Kamil WRÓBEL (ORCID: 0000-0002-6356-0780) w roku 2011 ukończył studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. W 2020 r. uzyskał stopień doktora na Wydziale Inżynierii Chemicznej i Procesowej Politechniki Warszawskiej. Pracuje na stanowisku głównego specjalisty w Grupie Badawczej Technologii Chemicznej i Elektrochemii w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie. Specjalność – elektrochemia, recykling hydrometalurgiczny, mikroskopia elektronowa.

*** Adres do korespondencji:**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego, ul. Rydygiera 8, 01-793 Warszawa, tel.: 453-056-292, e-mail: katarzyna.skrzypczyńska@ichp.lukasiewicz.gov.pl

surowców pierwotnych oraz ilości odpadów deponowanych na składowiskach. Szczególną uwagę w tworzeniu rynku surowców wtórnych zwraca się na sektory wymagające dużej ilości zasobów, w tym elektronikę.

Światowa produkcja odpadów elektrycznych i elektronicznych (elektroodpadów) rośnie obecnie 5-krotnie szybciej niż udokumentowany poziom ich recyklingu. Według raportu The Global E-waste Monitor 2024⁶⁾ w 2022 r. na świecie wygenerowano rekordowe 62 mln t elektroodpadów, co stanowiło wzrost o 82% w porównaniu z 2010 r. Prognozy wskazują, że do 2030 r. ilość ta zwiększy się o kolejne 32%, osiągając poziom 82 mln t/r. W Unii Europejskiej (UE), zgodnie z danymi Eurostatu⁷⁾, łączna ilość sprzętu elektrycznego i elektronicznego EEE (*electrical and electronic equipment*) wprowadzonego do obrotu w UE wzrosła z 7,6 mln t w 2012 r. do szczytu 14,4 mln t w 2022 i 2023 r., co stanowiło wzrost o 89% w całym okresie 2012–2023. Całkowita ilość zebranego zużytego sprzętu WEEE wzrosła z 3,0 mln t w 2012 r. do 5,2 mln t w 2023 r. (+75%), podczas gdy całkowita ilość przetworzonego WEEE wzrosła w tym samym okresie z 3,1 mln t do 5,2 mln t (+66%). Odzyskany WEEE wzrósł z 2,6 do 4,8 mln t (+83%), a WEEE poddany recyklingowi i przygotowany do ponownego użycia wzrósł z 2,4 do 4,3 mln t (+77%) w latach 2012–2023²⁾. Kwestie dotyczące odpowiedniego gospodarowania zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym regulują przepisy UE⁸⁾, głównie dyrektywy^{9, 10)}, włączone do prawa polskiego poprzez ustawy^{11, 12)} oraz akty wykonawcze do nich.

Znaczącą rolę w strumieniu elektroodpadów odgrywiają urządzenia mobilne. Szacuje się, że ok. 84% światowej populacji posiada smartfony, a w 2022 r. w użyciu było prawie 16 mld telefonów komórkowych, z czego 5,3 mld stało się odpadami. Jednocześnie w UE jedynie ok. 10% użytkowników przekazuje stare telefony do recyklingu w momencie ich wymiany¹³⁾. Dane te wskazują na znaczący potencjał niewykorzystanych zasobów materiałowych pozostających poza formalnymi systemami odzysku.

Telefony komórkowe są złożonymi urządzeniami elektronicznymi, w których kluczową rolę odgrywiają płytki drukowane PCB (*printed circuit board*) oraz magnesy, stanowiące główne nośniki surowców krytycznych¹⁴⁾. Płytki

PCB odpowiadają za ok. 83% całkowitej frakcji metalicznej w smartfonach i zawierają zarówno metale żelazne (żelazo, nikiel), jak i metale nieżelazne, w szczególności miedź^{14, 15)}. Ponadto w urządzeniach mobilnych występują metale szlachetne, takie jak złoto, srebro oraz metale z grupy platynowców, wykorzystywane w elementach przewodzących i stykach elektrycznych. Ze względu na wysokie zawartości tych metali w płytkach PCB, ich odzysk z zużytych telefonów stanowi istotne źródło surowców wtórnych, często o koncentracjach przewyższających zawartość w rudach pierwotnych^{16, 17)}.

Znaczenie odzysku surowców krytycznych zostało podkreślone w dokumentach i regulacjach prawnych Unii Europejskiej^{18–22)}. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady¹⁸⁾ CRMA (*Critical Raw Materials Act*) ustanawia ramy służące zapewnieniu UE dostępu do bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz wyznacza cele do 2030 r., zgodnie z którymi co najmniej 25% zużycia strategicznych surowców powinno pochodzić z recyklingu. Akt ten wprowadza również obowiązki w zakresie monitorowania łańcuchów dostaw oraz wymogi dotyczące wdrażania rozwiązań gospodarki o obiegu zamkniętym przez przedsiębiorstwa wykorzystujące metale krytyczne. Niewywiązywanie się z obowiązków związanych z gospodarką surowcową podlega sankcjom ustalonym przez państwa członkowskie. W Polsce mogą to być administracyjne kary finansowe sięgające 500 tys. zł²³⁾.

W świetle tych uwarunkowań rozwój efektywnych hydrometalurgicznych i elektrochemicznych technologii odzysku metali z elektroodpadów staje się nie tylko zagadnieniem środowiskowym (ochrona środowiska i zdrowia ludzi), lecz również elementem bezpieczeństwa surowcowego i konkurencyjności gospodarki.

Część doświadczalna

Materiały

Materiał badawczy stanowiły zużyte telefony komórkowe, pozbawione akumulatorów oraz wszelkich elementów mogących stanowić zagrożenie podczas obróbki mechanicznej. Odpady te charakteryzowały się złożoną strukturą materiałową: zawierały tworzywa sztuczne,



Mgr inż. Dorota KOLASA (ORCID: 0000-0002-0224-9809) ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. Jest starszym specjalistą w Grupie Badawczej Technologii Chemicznej w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie. Specjalność – chemia analityczna, analiza nieorganiczna.



Dr inż. Wojciech TOKARZ (ORCID: 0000-0003-3737-8261) w roku 2009 uzyskał stopień doktora nauk chemicznych na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Obecnie pełni funkcję głównego specjalisty Sekcji Procesów Elektrochemicznych w Sieci Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie. Jest współautorem kilkunastu publikacji naukowych. Specjalność – procesy elektrochemiczne związane z ogniwami paliwowymi i elektroliza PEM.

szkło, ceramikę oraz frakcję metaliczną z zawartością m.in. miedzi, srebra, złota, niklu, cyny, ołowiu i metali z grupy platynowców.

Metodyka badań

W ramach projektu opracowano i zweryfikowano kilka wariantów procedur obróbki wstępnej badanego materiału odpadowego. Celem tych operacji było (i) zmniejszenie wielkości cząstek i zwiększenie powierzchni właściwej materiału, (ii) wstępne zagęszczenie frakcji metalicznej, (iii) usunięcie wybranych składników organicznych, w tym polimerowych, oraz (iv) poprawa efektywności kolejnych procesów hydrometalurgicznych i elektrochemicznych. Poszczególne etapy obróbki wstępnej obejmowały rozdrabnianie mechaniczne, obróbkę termiczną (prażenie), separację mechaniczną oraz separację magnetyczną.

We wszystkich analizowanych wariantach pierwszym etapem było dwustopniowe rozdrabnianie mechaniczne w młynach nożowych. Całe telefony komórkowe (po uprzednim usunięciu akumulatorów) poddawano wstępnemu rozdrobieniu, a następnie wtórnemu mieleniu w celu uzyskania granulatu o uziarnieniu poniżej 2,5 mm. Taka granulacja zapewniała efektywne uwalnianie metalicznych komponentów z matrycy polimerowej i ceramicznej, zwiększoną dostępność reagentów ługujących w kolejnych etapach oraz jednorodność próbki do dalszych badań.

W wybranych wariantach procedury materiał po rozdrobieniu poddawano procesowi prażenia w kontrolowanych warunkach temperaturowych. Celem tego etapu była częściowa degradacja frakcji organicznej (elementów polimerowych, żywic epoksydowych, laminatów) i poprawa (zwiększenie) kruchości materiału prowadzące do zwiększenia efektywności późniejszego ługowania metali. Parametry procesu (temperatura, czas wygrzewania, atmosfera) dobierano eksperymentalnie w zależności od charakterystyki wsadu.

Kolejnym etapem była separacja mechaniczna (np. sitowa), umożliwiająca wydzielenie frakcji o określonym zakresie uziarnienia, a następnie separacja magnetyczna, której celem było usunięcie frakcji ferromagnetycznej (głównie żelaza i stali). Operacje te pozwalały na wstępne wzbogacenie frakcji zawierającej metale nieżelazne i szlachetne oraz ograniczenie udziału składników balastowych w późniejszych procesach chemicznych.



Mgr inż. Aleksandra DĄBAŁA w roku 2025 ukończyła studia na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej, kierunek biotechnologia. Obecnie pracuje na stanowisku specjalisty w Grupie Badawczej Technologii Chemicznej w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Chemii Przemysłowej imienia Profesora Ignacego Mościckiego w Warszawie. Specjalność – chemia analityczna, elektrochemia.

Prace z zakresu ługowania wstępnie przetworzonego materiału prowadzono w reaktorach zbiornikowych z wykorzystaniem czynników ługujących na bazie kwasów mineralnych (HNO_3 , H_2SO_4). Szczegółowy dobór mieszanin ługujących oraz warunków procesu prowadzono na podstawie badań literaturowych, a bieżącą optymalizację procesu na podstawie uzyskiwanych wyników.

Zasadniczy etap odzysku, jakim było wydzielenie i ewentualnie oczyszczenie metali z cieczy poługowych, prowadzono metodą elektrolizy z kontrolą napięcia. Przyjęta na tym etapie metodyka badawcza zakładała najpierw dobór warunków elektrochemicznych w układach laboratoryjnych (o objętości roboczej do $0,06 \text{ dm}^3$), a następnie właściwy odzysk elektrochemiczny w układach o objętości roboczej do 20 dm^3 . Odzysk elektrochemiczny ukierunkowany był na selektywne wydzielenie metali w postaci osadów katodowych, przy zachowaniu odpowiednio wysokiej wydajności energetycznej procesu. W trakcie prac elektrochemicznych duży nacisk kładziono na czystość oraz wartość rynkową uzyskiwanych produktów metalicznych. Dlatego też wybrane ścieżki technologiczne w końcowym etapie odzysku zakładały dodatkowe oczyszczanie produktu metodą elektrorafinacji lub poprzez chemiczne roztworzenie osadu katodowego i ponowną elektrolizę.

Aparatura

Obróbkę wstępną materiału prowadzono z wykorzystaniem 2 młynów nożowych: ZWM Trymet T2-SW (moc 3,0 kW, sito o średnicy oczka 10 mm) oraz Rapid G15021-Auger (moc 2,2 kW, sito o średnicy oczka 5 mm), co umożliwiała dwuetapowe rozdrabnianie do wymaganej granulacji. Proces prażenia mechanicznie przetworzonego materiału prowadzono w elektrycznych piecach komorowych IZO o mocy 3,05 kW (badania laboratoryjne) oraz 16,1 kW (prace wielkolaboratoryjne), o maksymalnej temperaturze pracy 1100°C . Separację mechaniczną prowadzono na sitach stalowych za pomocą wytrząsarki IKA KS 4000i, a separację magnetyczną przy zastosowaniu separatora szufladowego marki ENES Magnesy.

Procesy ługowania prowadzono w układach o objętości $0,15\text{--}1,5 \text{ dm}^3$, wyposażonych w mieszadło mechaniczne oraz termostatowaną łaźnię wodną. Rozdział faz po ługowaniu uzyskiwano poprzez filtrację pod zmniejszonym ciśnieniem za pomocą pompy próżniowej KNF Laboport N820. Badania elektrochemiczne prowadzono w otwartym układzie dwuelektrodowym.

Skład pierwiastkowy osadów wyznaczano metodą SEM/EDS z wykorzystaniem mikroskopu elektronowego Thermo Fisher Phenom XL G2 lub JEOL JSM-6490 LV, natomiast ilościowe oznaczanie metali (Cu, Ag, Au, Pb) w cieczach i osadach poługowych wykonywano metodą FAAS (spektrometr absorpcji atomowej AAnalyst 800, Perkin Elmer). Próbki stałe roztwarzano za pomocą mineralizatora mikrofalowego UltraWAVE firmy Milestone pracującego w technologii SRC (*single reaction chamber*).

W celu potwierdzenia obecności i sprawdzenia poziomu zawartości metali docelowo przeznaczonych do odzysku materiałowego, prowadzono wstępne badania składu badanych materiałów (frakcji uzyskiwanych po procesach obróbki wstępnej) metodą skaningowej mikroskopii elektronowej SEM sprzężonej ze spektrometrią dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego EDS (analiza jakościowa i ilościowa w mikroobszarze powierzchni próbki). Analizę ilościową na zawartość metali wykonano metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (technika FAAS). W ramach przyjętej metodyki pomiarowej średnią zawartość wybranych/istotnych składników metalicznych (Cu, Ag, Au) w całej objętości próbek wyznaczono na podstawie analizy składu uzyskanych cieczy i osadów poługowych.

Wyniki badań i ich omówienie

Skład badanego materiału

W wyniku analizy SEM/EDS wybranych próbek stwierdzono obecność takich pierwiastków, jak C, O, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe, Cu i Zn. Dodatkowo, w zależności od badanej próbki, obserwowano także istotną obecność S, Mn, Ni, Br, Ag, Sn, Ba i Pb. Duża liczba zidentyfikowanych pierwiastków oraz bardzo szeroki zakres mierzonych zawartości (nawet w odniesieniu do tej samej próbki) potwierdziły złożony i niejednorodny charakter badanych materiałów odpadowych. Niemniej jednak ogólny zakres zidentyfikowanych pierwiastków był zgodny z charakterystyką badanego materiału odpadowego. Obecność C, O, Mg, Si, Ca, Ti i Ba wynikała z pozostałości po rozkładzie termicznym płyt drukowanych oraz elementów polimerowych, w tym ich napelniaczy i uniepalniaczy. Pierwiastki metaliczne, takie jak Al, Fe, Cu, Zn, Ag, Sn i Pb, pochodziły głównie z elementów elektronicznych i konstrukcyjnych. Przykładowe uśrednione wyniki analizy ilościowej metodą FAAS zestawiono w tabeli.

Wpływ obróbki wstępnej na efektywność ługowania

Dwustopniowe rozdrabnianie materiału w młynach nożowych pozwoliło na skuteczne uwolnienie frakcji metalicznej z matrycy polimerowo-ceramicznej. Uzyskanie granulatu o uziarnieniu poniżej 2,5 mm zwiększyło powierzchnię

właściwą materiału, co przełożyło się na poprawę kinetyki procesów ługowania.

Zastosowanie prażenia w wybranych wariantach badawczych prowadziło do częściowej degradacji frakcji organicznej oraz poprawy (zwiększenia) kruchości materiału, co sprzyjało dalszemu rozdrobnieniu i zwiększeniu dostępności reagentów. W rezultacie uzyskiwano wyższe wskaźniki przejścia metali do roztworu (efektywności ługowania), szczególnie w przypadku srebra. Separacja magnetyczna pozwoliła na ograniczenie udziału frakcji żelazowej w materiale kierowanym do ługowania, zmniejszając zużycie reagentów i minimalizując ryzyko współroztwarzania składników balastu.

Efektywność procesów hydrometalurgicznych

W przypadku odpadów PCB (skala laboratoryjna) zastosowanie dwuetapowego ługowania roztworami na bazie HNO_3 i H_2SO_4 , poprzedzonego prażeniem materiału, umożliwiło osiągnięcie efektywności ługowania bliskiej 100% zarówno dla Cu, jak i Ag. Wyniki te wskazały na wysoką skuteczność zaproponowanej sekwencji etapów oraz właściwy dobór parametrów procesu (skład medium ługującego, czas 2–7 h, kontrola temperatury).

W badaniach prowadzonych w skali wielkolaboratoryjnej (do 15 dm^3 dla ługowania) uzyskano efektywność ługowania ok. 90% dla Cu oraz prawie 100% dla Ag. Nieznaczne obniżenie efektywności ługowania miedzi w większej skali można wiązać z ograniczeniami transportu masy oraz inną niż w skali laboratoryjnej charakterystyką mieszania, co wskazuje na potrzebę dalszej optymalizacji parametrów hydrodynamicznych przy skalowaniu procesu.

W przypadku zużytych telefonów komórkowych, materiale o bardziej złożonym składzie, trój etapowe ługowanie umożliwiło osiągnięcie efektywności na poziomie 96–99% dla Cu i Ag oraz 43% dla Au (rys. 1). Mniejsza skuteczność ługowania złota wynikała z jego małej zawartości oraz współobecności mniej szlachetnych metali w odpadzie, a także z ograniczonej reaktywności w stosowanych warunkach. Wyniki te były jednak zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi procesów hydrometalurgicznych prowadzonych bez użycia agresywnych układów cyjankowych czy wody królewskiej.

Odzysk elektrochemiczny i jakość produktów

Elektroliza roztworów poługowych PCB pozwoliła na uzyskanie miedzi metalicznej o czystości 95–99% w skali laboratoryjnej i ok. 99% w skali wielkolaboratoryjnej. Efektywność odzysku elektrochemicznego wynosiła 90–99% dla Cu oraz 80–99% dla Ag, w zależności od wariantu procesu i skali badań (rys. 2).

Srebro wydzielono w postaci osadu o czystości $\geq 99,9\%$ (w przypadku telefonów komórkowych) lub w formie kompozytu AgSnSb (PCB). Analizy SEM/EDS potwierdziły jednorodność składu oraz brak istotnych zanieczyszczeń obcych. Zastosowanie elektrolizy pulso-

Table. Example content of selected metals (Cu, Ag, Au) in the tested waste fractions from used mobile phones

Tabela. Przykładowa zawartość wybranych metali (Cu, Ag, Au) w badanych frakcjach odpadów z zużytych telefonów komórkowych

Materiał	Zawartość, % mas.		
	Cu	Ag	Au
Bez obróbki termicznej	11,4	0,061	0,021
Po obróbce termicznej	23,2	1,1	0,048

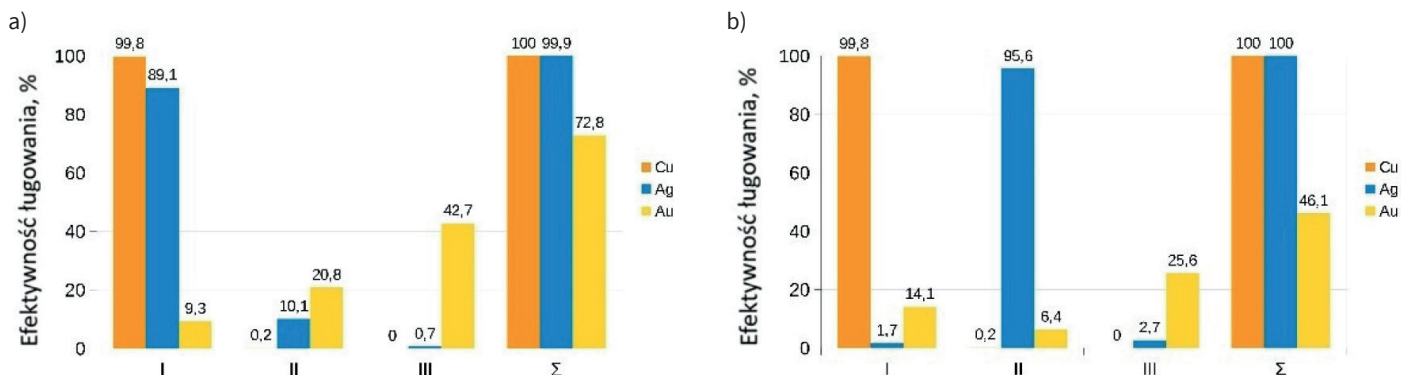


Fig. 1. Efficiency of Cu, Ag and Au leaching in subsequent process stages; a) material not subjected to thermal treatment – NT fraction, and b) after thermal treatment – P fraction

Rys. 1. Efektywność ługowania Cu, Ag i Au w kolejnych etapach procesu; a) materiał niepoddany obróbce termicznej (frakcja NT), b) po obróbce termicznej (frakcja P)

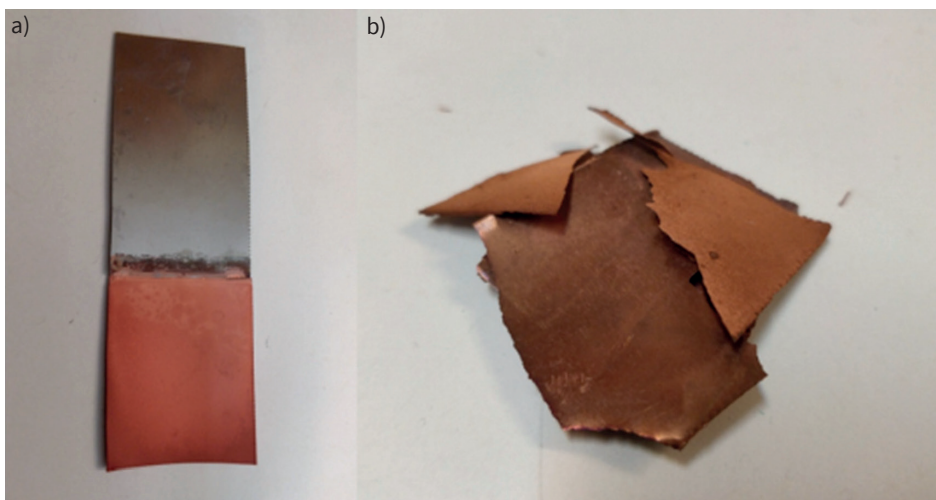


Fig. 2. Cathode covered with the deposit (a) and the Cu product (b) obtained in the electrochemical copper recovery process

Rys. 2. Katoda pokryta osadem (a) oraz produkt Cu uzyskany w procesie elektrochemicznego odzysku miedzi (b)

wej w procesie separacji mieszaniny Ag-Sn-Sb pozwoliło na zwiększenie udziału srebra w osadzie katodowym do ok. 80%, co wskazuje na możliwość kontrolowania selektywności procesu poprzez odpowiednią modulację parametrów prądowych.

W przypadku złota odzyskiwanego z telefonów komórkowych uzyskano kompozyt CuAu, przy efektywności elektrochemicznej ok. 62%. Choć wartość ta była mniejsza niż w przypadku Cu i Ag, to potwierdziła ona możliwość odzysku Au bez stosowania wysoko toksycznych reagentów, co stanowi istotną przewagę środowiskową opracowanej technologii.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały wysoką skuteczność opracowanej sekwencji procesów hydrometalurgicznych i elektrochemicznych w odzysku metali krytycznych z odpadów PCB oraz zużytych telefonów komórkowych.

Zastosowanie dwustopniowego rozdrabniania, prażenia, separacji mechanicznej i magnetycznej pozwoliło uzyskać jednorodny materiał wyjściowy o zwiększonej reaktywności chemicznej, co przełożyło się na wysoką efektywność procesów ługowania i elektrolizy. W przypadku odpadów PCB w skali laboratoryjnej osiągnięto efektywność ługowania miedzi i srebra na poziomie prawie 100%, natomiast w skali wielkolaboratoryjnej wyniosła ona ok. 90% dla miedzi i prawie 100% dla srebra. W przypadku zużytych telefonów komórkowych efektywność ługowania wyniosła 96–99% dla miedzi i srebra oraz 43% dla złota, co wynikało m.in. z bardzo wysokiej inertności chemicznej tego metalu. Odzysk

elektrochemiczny pozwolił uzyskać produkty metaliczne o wysokiej czystości: miedź 95–99%, srebro $\geq 99,9\%$ oraz kompozyty AgSnSb i CuAu, przy czym zastosowanie elektrolizy pulsowej zwiększyło selektywność wydzielania srebra do ok. 80% w osadach katodowych. Uzyskane wyniki wskazują, że opracowana technologia stanowi ekologicznie i ekonomicznie atrakcyjną alternatywę dla konwencjonalnych procesów pirometalurgicznych, umożliwiając odzysk metali krytycznych w postaci gotowych produktów metalicznych i kompozytów. Technologia ta wspiera wdrażanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym, zwiększa bezpieczeństwo surowcowe i ogranicza negatywny wpływ elektroodpadów na środowisko, potwierdzając, że odpady elektroniczne stanowią stabilne i wysokoskoncentrowane źródło miedzi, srebra i złota, gotowe do dalszego przetworstwa przemysłowego.

Otrzymano: 03-03-2026

Zaakceptowano: 29-04-2026

Zrecenzowano: 09-03-2026

Opublikowano: 25-05-2026

LITERATURA

- [1] J. Morell, D. Ribas, I. Tristany, X. Guimerà, A.D. Dorado, *Waste Manag.* 2025, **196**, 93, DOI: 10.1016/j.wasman.2025.02.014.
- [2] A. Grislin, Efektywne gospodarowanie zasobami a gospodarka o obiegu zamkniętym, *Noty tematyczne o Unii Europejskiej* 2025, 10, <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pl/sheet/76/efektywne-gospodarowanie-zasobami-a-gospodarka-o-obiegu-zamknietym>, dostęp 30 stycznia 2026 r.
- [3] Anonim, Jak UE chce osiągnąć gospodarkę o obiegu zamkniętym do 2050 r.?, <https://www.europa.eu/topics/pl/article/20210128STO96607/jak-ue-chce-osiagnac-gospodarke-o-obiegu-zamknietym-do-2050-r>, dostęp 4 kwietnia 2025 r.
- [4] Anonim, Nowy plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym na rzecz czystszej i bardziej konkurencyjnej Europy, Bruksela, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=COM%3A2020%3A98%3AFIN>, dostęp 11 marca 2020 r.
- [5] Anonim, Gospodarka o obiegu zamkniętym. Definicja, znaczenie korzyści, <https://www.europarl.europa.eu/topics/pl/article/20151201STO05603/gospodarka-o-obiegu-zamknietym-definicja-znaczenie-i-korzysci-wideo>, dostęp 24 maja 2023 r.
- [6] C.P. Baldé, R. Kuehr, T. Yamamoto i in., Electronic waste rising five times faster than documented e-waste recycling, *The global E-waste Monitor UN 2024*, <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>.
- [7] Waste statistics. Electrical and electronic equipment, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics_-_electrical_and_electronic_equipment, Oct 2025.
- [8] D. Kolasa, J. Lach, K. Wróbel, K. Samsonowska, A. Kaszuba, A. Stępkowska, J. Wróbel, *Polimery* 2023, **68**, 32, DOI: 10.14314/polimery.2023.1.5.
- [9] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2008/98/WE z dnia 19 listopada 2008 r. w sprawie odpadów oraz uchylająca niektóre dyrektywy, *Dz.U.* L 312 z 22.11.2008, str. 3, z późn. zm., <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/2025-10-16>.
- [10] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE), *Dz.U.* L 197 z 24.07.2012, 38, z późn. zm., <http://data.europa.eu/eli/dir/2012/19/2024-04-08>.
- [11] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach, *Dz.U.* 2023, poz. 1587, z późn. zm., <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20130000021>.
- [12] Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o zużyciu sprzętu elektrycznym i elektronicznym, *Dz.U.* 2024, poz. 573, <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20150001688>.
- [13] Green ICT. Digital devices in households, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Green ICT_-_digital_devices_in_households, June 2025.
- [14] C. Magrini, F. Verga, I. Bassani, C.F. Pirri, A. Abdel Azim, *Bioengineering* 2025, **12**, nr 2, 101, DOI: 10.3390/bioengineering12020101.
- [15] M. Gómez, S. Grimes, Y. Qian, Y. Feng, G. Fowler, *J. Clean Prod.* 2023, **419**, 138099, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138099.
- [16] Z.Y. Zhang, L. Wu, K. He, F.S. Zhang, *Waste Manag.* 2022, **153**, 13, DOI: 10.1016/j.wasman.2022.08.011.
- [17] L.E.N. Gamage, A.K. Basak, A. Pramanik, C. Prakash, S. Subramaniam, S. Debnath, A.R. Dixit, S. Chattopadhyaya, S. Ramakrishana, *Mater. Circular Economy* 2023, **5**, nr 1, 8, DOI: 10.1007/s42824-023-00081-x.
- [18] Areas of specific interest, *European Commission: Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs*, Fifth list 2023 of critical raw materials for the EU, https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.
- [19] G. Ragonnaud, *Critical raw materials act*, Research Service European Parliament, [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747898/EPRS_BRI\(2023\)747898_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747898/EPRS_BRI(2023)747898_EN.pdf), Nov 13, 2023.
- [20] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1252 z dnia 11 kwietnia 2024 r. w sprawie ustanowienia ram na potrzeby zapewnienia bezpiecznych i zrównoważonych dostaw surowców krytycznych oraz zmiany rozporządzeń (UE) nr 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 i (UE) 2019/1020, *Dz.U.* L 2024/1252, 03.05.2024, z późn. zm., <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/2024-05-03>.
- [21] *European Critical Raw Materials Act*, European Commission, https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en, Mar 16, 2023.
- [22] *Critical Raw Materials Act*, European Commission, https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en, dostęp 30 stycznia 2026 r.
- [23] A. Pawlukiewicz, A. Piotrowska, D. Trela, M. Ścibura, Polish response to the CRMA – draft law on securing critical raw materials for the national economy, <https://sw.solutions/en/polish-response-to-the-crma-draft-law-on-securing-critical-raw-materials-for-the-national-economy/>, Oct 9, 2025.

przemysł chemiczny

publikuj w trybie

OPEN
ACCESS

KONTAKT Z NAMI

publikacje naukowe
www.przemyslchemiczny.com

redakcja czasopisma
przemyslchemiczny@sigma-not.pl