

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA**

**Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej**

**Katedra Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców**

mgr inż. Dawid Franke

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

***Eko-efektywna technologia odzysku metali z płyt obwodów drukowanych***

Promotor: **dr hab. inż. Tomasz Suponik, prof. PŚ**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Paweł Nuckowski**

Gliwice 2023

# POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej

Katedra Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców

mgr inż. Dawid Franke

**Streszczenie rozprawy doktorskiej pt.**

*Eko-efektywna technologia odzysku metali z płyt obwodów drukowanych*

Zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny (ZSEE) jest obecnie z jednym z najszybciej rosnących strumieni odpadów. Niewłaściwe magazynowanie lub przetwarzanie ZEEE może być przyczyną problemów środowiskowych i degradacji środowiska przyrodniczego. Dynamicznie rosnąca ilość tych odpadów staje się wyzwaniem dla firm odzyskujących wartościowe substancje, a znaczący wzrost popytu na urządzenia elektroniczne spowodowany m.in. pandemią COVID-19 może dodatkowo zwiększyć produkcję ZSEE w najbliższych latach. Elementem występującym niemal we wszystkich ZSEE są płyty obwodów drukowanych (ang. *Printed Circuit Boards*, PCB). Najczęściej stosowanymi są PCB typu FR-4, które zbudowane są z podłoża wykonanego z włókna szklanego i żywicy epoksydowej. W kompozycie zużytych płyt obwodów drukowanych (ang. *Waste Printed Circuit Boards*, WPCB) FR-4 zatopione są metaliczne ścieżki zawierające duże ilości metali takich jak Cu, Fe, Al, Sn, pierwiastki ziem rzadkich, Ta, Ga i innych z grupy lantanowców oraz metale szlachetne: Au, Ag i Pd. WPCB FR-4 zawierają również metale niebezpieczne dla zdrowia i życia ludzi oraz środowiska przyrodniczego, takie jak Cr, Pb, Be, Hg, Cd, Zn, Ni. Dlatego w celu ochrony złóż i środowiska WPCB powinny być przetwarzane zgodnie z zasadami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonej produkcji.

Najczęściej stosowanymi metodami recyklingu WPCB są metody chemiczne polegające na ich roztrawianiu w kwasach lub spalaniu. Poza wysokim stopniem skomplikowania tych metod oraz wysokimi emisjami do środowiska przyrodniczego, następuje utrata części niemetalicznych, które mogłyby być wykorzystane do innych procesów produkcyjnych lub wytwórczych. Alternatywnymi sposobami przetwarzania WPCB są metody fizyczne i fizykochemiczne z zakresu inżynierii mineralnej. Wykazują one znacznie mniejszy wpływ na środowisko przyrodnicze, jednak z uwagi na trudność uwolnienia metali od kompozytu WPCB, polegające na konieczności stosowania szeregu procesów technologicznych, są one rzadziej stosowane.

Wobec powyższego sformułowano tezę pracy: istnieje możliwość opracowania i zastosowania eko-efektywnej technologii do recyklingu zużytych płyt obwodów drukowanych, która wykorzystuje procesy fizyczne z zakresu inżynierii mineralnej i jest zgodna z zasadami zrównoważonej produkcji i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Głównym celem rozprawy było eksperymentalne zweryfikowanie możliwości zastosowania znanych metod z zakresu inżynierii mineralnej, których zintegrowanie pozwoli opracować efektywną i ekonomicznie uzasadnioną technologię recyklingu zużytych płyt obwodów drukowanych zgodną z zasadami zrównoważonej produkcji i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Aby osiągnąć cel rozprawy dokonano oceny procesów jednostkowych, tj. demontażu, rozdrabniania, mielenia i separacji oraz zabezpieczenia produktów do transportu. Ocenę zrealizowano na trzech poziomach: sprawność procesu, koszty procesowe i inwestycyjne oraz oddziaływanie na środowisko przyrodnicze oraz człowieka. Rozprawa w szczególności przedstawia wyniki badań rozdrabniania, mielenia w młynie nożowym z zastosowaniem ciekłego azotu, separacji elektrostatycznej, flotacji, separacji grawitacyjnej przy użyciu separatora cyklofluidalnego i stołu koncentracyjnego oraz zabezpieczenia produktów do transportu. Głównym osiągnięciem pracy było opracowanie zintegrowanej technologii recyklingu WPCB stanowiącej alternatywę dla obecnie stosowanych chemicznych metod recyklingu. Uzyskano wysoki poziom uwolnienia metali od kompozytu WPCB stosując kriogeniczne temperatury podczas mielenia płyt w młynie nożowym, jak również wysoką sprawność rozdziału metali od kompozytu przy zastosowaniu separacji elektrostatycznej. Ponadto, na podstawie analiz ekonomicznych i ocen oddziaływania na środowisko przyrodnicze oraz człowieka, wykazano, że zaproponowana technologia jest niskokosztowa i wysokosprawna, jak również może być uznana za zgodną z zasadami zrównoważonej produkcji i gospodarki o obiegu zamkniętym.