

Wrocław, 12 grudnia 2023

prof. dr hab. inż. Jan Drzymała
emerytowany prof. zw. Wydziału Geoinżynierii
Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej
e-mail: jan.drzymala@pwr.edu.pl

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Dawida Frankego zatytułowanej
Eko-efektywna technologia odzysku metali z płyt obwodów drukowanych

Recenzji rozprawy doktorskiej dokonano w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z dnia 15 listopada 2023 r. oraz skierowanego do mnie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina z dnia 28 listopada 2023 r. Praca doktorska Pana Dawida Frankego wykonana została na Wydziale Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej, w Katedrze Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Politechniki Śląskiej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Tomasz Suponik, prof. PŚ, a promotorem pomocniczym dr inż. Paweł Nuckowski.

Praca doktorska dotyczy wykorzystania metod fizycznych i fizykochemicznych do przerobu zużytych płyt obwodów drukowanych celem ich wzbogacenia w metale oraz wyboru tej metody, która jest ekologicznie efektywna, biorąc pod uwagę jakość produktów wzbogacania, oddziaływanie na środowisko oraz parametry ekonomiczne wpływające na koszty procesowe i inwestycyjne. Wśród rozpatrywanych metod były separacje elektrostatyczna, hydrauliczna, w cienkiej strudze wody oraz flotacja i bioługowanie. Dodatkowo rozprawa doktorska była realizowana i pisana z myślą o zgodności z zasadami zrównoważonej produkcji i gospodarki o obiegu zamkniętym. Rozprawa doktorska jest oparta o wcześniejsze publikacje własne z promotorem oraz współautorskie. Brak publikacji wyłącznie autora rozprawy doktorskiej. Należy jednak zauważyć, że w kluczowych pracach doktorant jest pierwszym autorem, a jedna z nich była opublikowana tylko z promotorem.

W mojej opinii recenzowana rozprawa i jej materiały źródłowe są merytorycznie ważne, aktualne oraz użyteczne naukowo i aplikacyjnie.

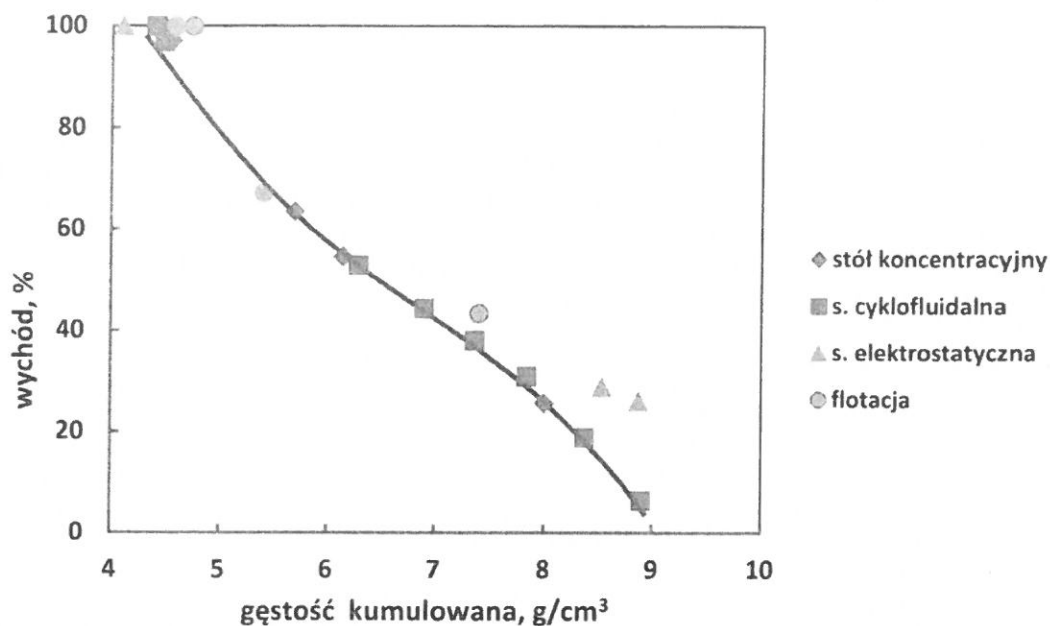
Rozprawa doktorska Pana Dawida Frankego ma stronę tytułową, a właściwa rozprawa znajduje się na stronach 15-62. Rozprawa kończy się bibliografią zawierającą 65 pozycji literaturowych. Rozprawa zawiera 6 rozdziałów oznaczonych symboliką arabska. W ramach rozprawy, na innych stronach, znajdują się podziękowania (str. 3), streszczenie (str. 5), spis treści (str. 7), lista głównych publikacji (str. 9-10), lista zgłoszeń patentowych (str. 11), punkty MEiN i IF współpublikacji autora rozprawy, fotokopie 6 współpublikacji oraz potwierdzenie Urzędu patentowego Rzeczypospolitej Polskiej o przyjęciu wniosku o udzielenie patentu na wynalazek, w którym nie podano autorów wynalazku.

W pracy znajduje się wiele tabel i rysunków, które są poprawnie sporządzone i dobrze wkomponowane w tekst rozprawy, z wyjątkiem rysunku 5.8 oraz tabeli 5.13, których wady będą omówione w dalszej części tej recenzji traktującej o niedociągnięciach.

Dokonany na potrzeby rozprawy przegląd literaturowy jest wykonany poprawnie, a jego zawartość dobrze harmonizuje z tekstem pracy. Stosowane w rozprawie skróty są wyjaśnione, co ułatwia śledzenie toku, celu i sposobu prowadzenia eksperymentów oraz ich interpretacji. Do osiągnięć pracy należą zaliczyć użycie różnorodnych metod przerobczych do wzbogacenia trudnych produktów, jakimi są zużyte płyty obwodów drukowanych. Godnym podkreślenia jest użyteczne zastosowanie, na etapie kruszenia, ciekłego azotu. Stosując separację elektrostatyczną udało się otrzymać bogaty koncentrat metali z dobrą wydajnością. Wykazano również, że w wyniku separacji można także otrzymać produkty pośrednie gorszej jakości. Poprawnie wskazano, że dalszy przerób bogatych i gorszych koncentratów jest niezbędny. Do tego celu można wykorzystać bioługowanie, co w pracy badano, a także ługowanie chemiczne, co znane jest z literatury. Dodatkowo w pracy zidentyfikowano i oceniono sprawności, koszty i oddziaływania na środowisko przyrodnicze oraz człowieka poszczególnych etapów recyklingu prowadzących do odzysku metali ze zużytych płyt obwodów drukowanych.

Analiza graficzna wyników badań poprawnie wykazała, że najlepsza jest separacja elektrostatyczna. Autor rozprawy nazwał ją górnolotnie „eko-efektywną technologią recyklingu przyczyniająca się do ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko” gdyż otrzymuje się koncentrat metali oraz tworzywa sztuczne, które „mogą być zastosowane do wytwarzania innych dóbr konsumpcyjnych”. Ponadto „relatywnie niski stopień jej skomplikowania i nisko-kosztowość, stanowią szansę na zwiększenie liczby instalacji recyklingu (zużytych płyt obwodów drukowanych, JD) w krajach Unii Europejskiej, tym samym zachowując cenne pierwiastki w gospodarce UE, jak również tworząc nowe miejsca pracy”.

Do ważnych osiągnięć prac prowadzonych przez doktoranta i jego współpracowników jest zaproponowanie i stosowanie gęstości właściwej jako parametru charakteryzującego jakość otrzymywanych produktów separacji. Zaproponowano to w pierwszej pracy cyklu o wzbogacaniu zużytych płyt obwodów drukowanych, w której doktorant był pierwszym autorem (Franke D., Suponik T., Nuckowski P., Gołombek K., Hyra K, *Recovery of metals from printed circuit boards by means of electrostatic separation*, Management Systems in Production Engineering, P.A. NOVA S.A., vol. 28, nr 4, 2020, s. 213-219). W mojej ocenie jest to jedyny z badanych przez doktoranta parametrów, który może być użyty do porównywania uzyskanych wyników separacji. Można to osiągnąć konstruując tzw. krzywe wzbogacania, w tym przypadku użyteczna jest zależność wychodu produktu od kumulowanej (ważonej) gęstości produktu separacji. W swojej rozprawie doktorant dokonał nieinżynierskiego (intuicyjnego) porównania danych, sporządzając zależność gęstości od nazwy lub w istocie od numeru kolejnego produktu. Proponowane przeze mnie krzywe wzbogacania dla wszystkich uzyskanych przez doktoranta wyników powinny wyglądać tak:



Dopiero teraz można wyciągnąć jednoznaczny wniosek, że separacja elektrostatyczna (trójkąty) jest najbardziej selektywna. Należy dodać, że w rozprawie jest błąd dotyczący wyników flotacji, a jest on rezultatem przedstawienia liczb (Tabela 5.9), co można dowieść porównując je danymi w oryginalnej publikacji. Nieuwzględnienie tego błędu powoduje, że gęstość nadawy jest bardzo zawyżona, a wyniki wzbogacania dla flotacji i wzbogacania elektrostatycznego stają się podobne.

W czasie analizowania rozprawy doktorskiej nasunęły mi się także uwagi krytyczne.

- w pracy materiał wyjściowy był rozdrabniany dwustopniowo. W przeróbce kopalin takie rozdrabnianie nazywa się odpowiednio kruszeniem i mieleniem. Autor nazwał je rozdrabnianie i mielenie

- niedociągnięcia w spisie literatury (poz. 34 oraz 36: brak nazwy czasopisma)
- tabela 5.4. Na zdjęciach rys. 5.4 nie widać punktów analizy omawianych w tabeli
- tabela 5.4. Nie wiadomo jak podane liczby się bilansują
- podawanie celu i tezy pracy to nadmiar informacji. Jest to w zasadzie to samo, tylko inaczej sformułowane. Teza dla rozprawy doktorskiej w mojej opinii jest najbardziej właściwa.

- na str. 28 podano że przeprowadzono optymalizację parametrów stosowanych separacji. Nie dostrzegam tych optymalizacji. Optymalizacje prowadzi się ze względu na jakieś kryterium. Co było tym kryterium, gdy wyniki separacji są charakteryzowane jednocześnie trzema parametrami (ilość produktu, jakość produktu, jakość nadawy)?

- wyniki bio-ługowania są powierzchownie opracowane
- brak streszczenie rozprawy doktorskiej w języku angielskim.

Oceniając dokonania zawarte w pracy należy stwierdzić, że rozprawa doktorska Dawida Frankego zatytułowana *Eko-efektywna technologia odzysku metali z płyt obwodów drukowanych*, wykonana pod kierunkiem dra hab. inż. Tomasza Suponika, prof. PŚ i promotora pomocniczego dra inż. Paweł Nuckowskiego, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegające na wykazaniu, że spośród różnorodnych metod przerobu zużytych płyt obwodów drukowanych (stół koncentracyjny, flotacja, separacje elektrostatyczna i cyklofluidalna), najlepsza pod względem selektywności jest separacja elektrostatyczna, która dostarcza bogaty w metale koncentrat i ewentualnie półprodukty. W rozprawie zaproponowano jak do separacji przygotować materiał (sortowanie, kruszenie, mielenie) i naszkicowano jak koncentrat metali musi być poddawany dalszym skomplikowanym zabiegom przeróbczym. Przeprowadzono także wstępne analizy środowiskowe oraz ekonomiczne każdego badanego procesu oraz wyznaczono ich wybrane parametry techniczne i ekonomiczne. Odnosić należy troskę doktoranta, aby prowadzone badania były eko-efektywne i zgodne z zasadami zrównoważonej produkcji oraz gospodarki o obiegu zamkniętym.

Praca spełnia wymogi art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Uważam, że doktorant posiada dobrą ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej w tym zakresie.

Proszę o dopuszczenie kandydata do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisał Jan Drzymała

12.XI.23