

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Dawida Franke  
pt. *Eko-efektywna technologia odzysku metali z płyt obwodów drukowanych*  
(promotor: dr hab. inż. Tomasz Suponik,  
promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Nuckowski)

Praca doktorska mgr. inż. Dawida Franke powstała w zespole naukowym dr. hab. inż. Tomasza Suponika, prof. Politechniki Śląskiej (PŚ) z Katedry Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców, Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej PŚ przy współpracy dr. inż. Pawła Nuckowskiego z Katedry Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydziału Mechanicznego Technologicznego PŚ.

Myślą przewodnią podjętych badań jest fakt, że zawartość metali w płytkach obwodów drukowanych jest istotnie większa niż w rudach metali. W tym odniesieniu, w dysertacji przedstawiono wyniki badań technologicznych wraz z oceną środowiskową i próbą wyceny kosztów procesowych odzysku metali z odpadowych płytek obwodów drukowanych (POD), jako elementy przyszłego projektu procesowego.

Strumień odpadów elektro sprzętu, który od kilku już dekad rośnie wykładniczo w skali globalnej – jeszcze przyspieszając w ostatnich kilku latach - stanowi wartościowe źródło surowców wtórnych, które należy przetwarzać w kraju. Udział POD w złomie elektronicznym również rośnie, chociażby z powodu ich starzenia funkcjonalnego. Z uwagi na złożoną kompozycję materiałową, przetwarzanie odpadów POD może być ekonomicznie nieopłacalne a zarazem niekorzystnie oddziaływać na środowisko przyrodnicze.

Podjęta w dysertacji tematyka wpisuje się więc w nurt współczesnych trendów gospodarki cyrkularnej i jest ważna z punktu widzenia gospodarczego i ekologicznego, a zarazem wymaga badań nad wymogami procesowymi i aspektami środowiskowymi. Praca badawcza i dysertacja mgr inż. Dawida Franke są więc uzasadnione i potrzebne pod względem naukowym i aplikacyjnym. Doktorant słusznie wybrał do badań metodę recyklingu bezpośredniego i wykazał zrozumienie dla uruchamiania lokalnie dostępnych zakładów recyklingu POD.

Pewnym wyzwaniem dla recenzenta jest ocena poszczególnych materiałów, składających się na rozprawę doktorską. Są to:

- 64. stronicowy tekst własny Doktoranta, obejmujący sześć rozdziałów, który dla porządku nazywam dysertacją,
- 6 artykułów-załączników z numeracją M1-M6, nazwanych przez Autora *głównymi publikacjami* oraz
- opis zgłoszenia patentowego oznaczony P1, stanowiący 7. załącznik,

w sumie 125 dodatkowych stron. Do wykonania recenzji otrzymałem wydruk pracy doktorskiej, zawierający w.w. składowe, oprawionej w twarde okładki wraz z listem przewodnim prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki w PŚ.

Dysertacja mgr inż. Dawida Franke zawiera 15 rysunków (przy czym rysunki 1.2., 2.1. i 2.2. są w istocie tabelami i tak powinny zostać zakwalifikowane), 13 tabel i 65 pozycji w wykazie literatury przedmiotu, z których połowa (33) została opublikowana w latach 2019-2023, a więc odpowiadają one aktualnemu stanowi wiedzy podstawowej i technicznej.

W rozdziale pierwszym dysertacji Doktorant uzasadnia znaczenie tematyki badawczej, w której przygotował rozprawę doktorską, m.in. nawiązując do gospodarki zużytym sprzętem elektrycznym i elektronicznym, w tym kompozycji i składu materiałowego zużytych POD, mając na uwadze efektywność ekologiczną sposobów recyklingu. Odwołuje się jeden raz do M5.

W drugim rozdziale wyszczególnia metody przetwarzania POD wskazując na zalety recyklingu materiałowego i jego relatywnie niewielkie oddziaływanie na środowisko w odniesieniu do metod hydrometalurgicznych i pirometalurgicznych. Następuje czterokrotne odwołanie się do artykułów M5 i M6.

W trzecim rozdziale, stanowiącym jedną stronę, wskazano cel i zakres rozprawy doktorskiej i sformułowano tezę badawczą odnośnie możliwości przyjaznego środowisku *recyklingu POD z wykorzystaniem procesów fizycznych z zakresu inżynierii mineralnej*. Zaproponowane podejście mieści się w odzyskiwaniu określonych frakcji odpadów komunalnych w ramach tzw. *górnictwa miejskiego (urban mining)* - w przypadku pracy doktorskiej mgr inż. Dawida Franke są to wybrane metale.

Odwołując się do wszystkich publikacji M1-M6, w rozdziale czwartym zamieszczono szczegółową metodykę badawczą dla czterech kluczowych aparatów, służących bezpośredniemu recyklingowi POD po zdemontowaniu wybranych komponentów z płytek. W ciągu technologicznym aparaty stanowią centrum określonych węzłów technologicznych, w których realizowanych jest z reguły kilka operacji jednostkowych. Doktorant wielokrotnie stosuje w dysertacji, ale też w artykułach, których jest współautorem, niepoprawny termin *proces jednostkowy* do jednostkowych czynności technologicznych, w których następują zmiany fizyczne. Jako *proces jednostkowy* określa się czynności jednostkowe, podczas których zachodzą przemiany chemiczne. A więc, operacje jednostkowe z dysertacji obejmują: rozdrabnianie średnie wstępne w młynie typu Shredder i rozdrabnianie drobne w młynie nożowym (m.in. w warunkach kriogenicznych – ciekły azot), kluczowe dla uwolnienia komponentów płytek, a następnie separację elektrostatyczną w laboratoryjnym urządzeniu bębnowym, separację grawitacyjną z wykorzystaniem stołu koncentracyjnego i separatora cyklofluidalnego oraz flotację w maszynie flotacyjnej typu WEMCO z doładowaniem powietrza, w celce o objętości 1 dm<sup>3</sup>. Proponowaną przez Doktoranta sprężarkę należy zastąpić dmuchawą, patrz: ostatni wiersz na stronie 51. Do obróbki konglomeratów metale–tworzywa sztuczne zaproponowano i wykorzystano procedurę hydrometalurgiczną wspieraną acidofilnymi bakteriami z rodzaju *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Do oceny efektów separacji w operacjach jednostkowych zastosowano analizę sitową wraz z zaawansowaną analizą instrumentalną, którą w szerokim zakresie prowadził Doktorant samodzielnie.

W rozdziale piątym zamieszczono wyniki badań wraz z ich omówieniem. Zastosowanie młyna nożowego z perforacją sita 1 mm oraz chłodzenie nadawy do temperatury kriogenicznej ciekłym azotem znacznie poprawiało uwolnienie składników POD. Po zmieleniu mieszaninę drobnoziarnistą poddawano separacji elektrostatycznej uzyskując wysoką sprawność oddzielenia wolnych cząstek metali od tworzyw sztucznych i materiałów ceramicznych. Przed

mieleniem demontowano komponenty niebezpieczne, obejmujące m. in. baterie, kondensatory i radiatory. Zaproponowana procedura technologiczna pozwala odzyskiwać metale, a tym samym chronić środowisko poprzez unikanie kosztów wydobycia, transportu, rozdrabniania i wzbogacania rud metali. Opis efektów obróbki POD - w tym szczególnie za pomocą flotacji - byłby bardziej klarowny, gdyby wyznaczano współczynniki separacji. Doktorant podkreśla, że prowadził flotację w warunkach optymalnych, jednak nie przedstawił zarówno w dysertacji, jak i w M4 zastosowanej procedury optymalizacyjnej.

W rozdziale szóstym, stanowiącym podsumowanie dysertacji, podkreślono pozytywne efekty uwalniania komponentów POD w wyniku rozdrabniania i separacji na metale i tworzywa sztuczne w czterech podstawowych węzłach technologicznych, nazwanych w pracy "*etapami*". Niewątpliwie wyróżnić należy korzystne rezultaty separacji elektrostatycznej, prowadzonej jednak w oderwaniu od rozdrabniania POD w warunkach głębokiego schłodzenia. Chodzi o zapewnienie odpowiednio niskiej wilgotności materiału kierowanego do separatora elektrostatycznego. Sam węzeł technologiczny separacji elektrostatycznej obejmuje kilka operacji jednostkowych, niezbędnych do uzyskania założonej efektywności procesu, z których nawiązano tylko do suszenia. Badania Doktoranta są rozległe, ukierunkowane na wdrożenie, ale w dysertacji nie wskazano jaki został osiągnięty TRL – proszę o komentarz w czasie obrony. "Schemat ideowy" zamieszczony na Rys. 6.1. str. 56, nie sporządzono zgodnie z zasadami konstruowania schematu ideowego według wymogów projektu procesowego. Oczekuję, że Doktorant przygotuje na obronę schemat ideowy z uwzględnieniem wszystkich strumieni masowych opracowanej przez siebie *zintegrowanej* technologii recyklingu POD, łącznie z bilansem materiałowym i energetycznym, korzystnie jako wykresy Sankey'a. Poza podstawową technologią pozostaje epizod badawczy z praktycznym, ale mało wydajnym procesem jednostkowym bioługowania *półproduktu*, który stanowiły połączone adhezyjnie cząstki metali i polimerów (M6).

Integralną część rozprawy doktorskiej stanowi 6 wymienionych wcześniej współautorskich artykułów i zgłoszenie patentowe z numeracją od M1 do M6 + P1. Liczba współautorów w artykułach wynosi od 2 do 8, zaś w zgłoszeniu patentowym jest dwóch współtwórców, dlatego mgr inż. Dawid Franke wskazał na początku dysertacji (strony 9-11) zakres własnego wkładu badawczego w tych pracach. Artykuły i zgłoszenie patentowe oceniłem porównując w Tabeli 1. zadeklarowany przez Doktoranta wkład naukowo-badawczy w pracach M1-M6 oraz P1 z elementami nowości naukowej wykonanych osobiście badań, wskazanych we *Wnioskach* poszczególnych artykułów.

Tabela 1. Porównanie zadeklarowanego wkładu Doktoranta w przygotowanie artykułów M1-M6 oraz opisu patentowego P1 z nowością naukową i techniczną, wskazaną we *Wnioskach* tych publikacji

| Lp | Nr/rok publikacji<br>Cytowania** | Liczba współ-<br>autorów | Zadeklarowany wkład<br>Doktoranta<br>w przygotowanie publikacji                                                                          | Nowość naukowa<br>i techniczna wskazana<br>we <i>Wnioskach</i> publikacji                                                                         |
|----|----------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | M1/2021<br>18                    | 6/2*                     | Badania rozdrabniania w młynku nożowym i separacji elektrostatycznej, analiza granulometryczna, mikroskopowa i pomiar gęstości produktów | Duży wkład badawczy i interpretacyjny, opracowanie parametrów procesowych, wysokie wskaźniki wyodrębnienia elektrostatycznego metali od plastików |

|   |                  |        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---|------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2 | M2/2020<br>13    | 5/1    | Demontaż elementów z płytek obwodów drukowanych, badania separacji elektrostatycznej                                                                                                                                                                                                                                  | Komplementarne techniki analityczne (ICP, EDS, XRD) do charakterystyki produktów separacji elektrostatycznej                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 3 | M3/2021<br>4     | 4/1    | Badania efektywności separacji na stole koncentracyjnym i w urządzeniu cyklofluidalnym, analiza mikroskopowa i wyznaczanie gęstości właściwej produktów                                                                                                                                                               | Porównanie wydajności separacji wymienionych technik grawitacyjnych z separacją elektrostatyczną, ze wskazaniem na tą ostatnią                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 4 | M4/2022<br>2     | 4/1    | Badania flotacji, analiza mikroskopowa i wyznaczanie gęstości właściwej produktów                                                                                                                                                                                                                                     | Zaproponowano parametry prowadzenia flotacji nadawy z POD uwzględniając korelację wydajności z analizą mikroskopową cząstek i fizykochemią powierzchni                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 5 | M5<br>w recenzji | 2/1    | Omówienie literatury przedmiotu n.t. wyboru metod recyklingu i ich zastosowań do zużytych POD, potencjału zastosowań i wybór metod proekologicznych. Ocena czynności jednostkowych procesu recyklingu pod względem bezpieczeństwa, środowiskowym, parametrów technicznych, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. | Manuskrypt stanowi kompilację dotychczasowych prac, opartych na solidnym doświadczeniu własnym, z próbą omówienia kosztów procesowych i inwestycyjnych oraz wpływu na środowisko dla procesu w skali laboratoryjnej. Przedsięwzięte zadanie uważam za trudno wykonalne bez poprawnego sporządzenia schematu ideowego procesu recyklingu wraz z bilansem materiałowym i energetycznym, a zarazem określeniem mocy zainstalowanej. |
|   | M6/2022<br>1     | 8/5    | Współprowadzenie procesu ługowania bakteryjnego i chemicznego; pisanie, recenzja i redakcja                                                                                                                                                                                                                           | Uzyskane wyniki badań potwierdzają udział i aktywność bakterii <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> w solubilizacji składników badanych elektrodopadów. Wykazano przydatność analizy komplementarnej SEM i S/TEM oraz ICP-OES i XRD do pełnej oceny przebiegu bioługowania.                                                                                                                                                     |
| 7 | P1/2019          | 2/2*** | <i>Integracja komponentów wynalazku w skali laboratoryjnej, współautorstwo opisu zgłoszenia patentowego</i>                                                                                                                                                                                                           | Wskazany w zgłoszeniu patentowym zakres wielkości fragmentów i cząstek uzyskanych z POD nie odzwierciedla przeprowadzonych badań.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |

\*/kolejność jako współautor lub współtwórca; \*\*/liczba cytowań wg Google Scholar;

\*\*\*Kolejność twórców podana w dysertacji mgr. inż. Dawida Franke na str. 11 jest niezgodna z danymi zawartymi na stronie domowej Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej, patrz: Szczegóły PAT - P.438999; a także w BIULETYNIE URZĘDU PATENTOWEGO Nr 13/2023 s.9

Z informacji podanych w Tabeli 1. wynika, że opublikowane przez mgr inż. Dawida Franke i współautorów wyniki badań wnoszą nowe elementy i rozwiązania odnośnie efektywności zasadniczych operacji jednostkowych opracowanego procesu technologicznego recyklingu POD. Liczba cytowań wszystkich prac wg Google Scholar od 2019 roku wynosi 58, przy czym najczęściej bo 18 razy był cytowany artykuł M1. Na 15 rozpoznawalnych międzynarodowo publikacji Doktorata tylko trzy nie były jeszcze cytowane. Aktualny Index Hirscha mgr. inż. Dawida Franke wynosi 4. Dysertacji nadano staranną szatę graficzną, niemniej zauważyłem niezręczne terminy techniczne i naukowe oraz liczne błędy maszynowe. Zrozumiałe i jednoznaczne wnioski – ze wskazaniem nowości technologicznej - korespondują z postawionymi zadaniami badawczymi, które zrealizowano na poziomie laboratoryjnym. W odniesieniu do wywodów w ostatnim akapicie z Podsumowania, strona 56 dysertacji – czy podjęto już dalsze działania odnośnie wdrożenia technologii?

Według deklaracji autorów, publikacje główne M1, M3, M4, M6 powstały przy wsparciu finansowania wewnętrznego Politechniki Śląskiej. Natomiast w publikacji *dodatkowej* O6 - strona 13. dysertacji – wskazano, że separację elektrostatyczną rozdrobionych POD przeprowadzono w ramach realizacji projektu współfinansowanego przez UE ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego. Brak jest podziękowania skierowanego do PŚ i UE za finansowanie badań i przygotowania dysertacji. Doktorant zamieścił na 3. stronie dysertacji tylko podziękowania osobowe.

#### Dodatkowe pytania na obronę

- Kluczową operacją jednostkową zaproponowanego w dysertacji procesu recyklingu płytek obwodów drukowanych jest rozdrabnianie. Wykorzystano do tego celu laboratoryjny młynek nożowy o wydajności do 10 kg/h (w zależności od zastosowanych sit), ale wykorzystując tylko 6% jego przepustowości. Wg producenta, młynek służy do rozdrabniania materiałów o twardości poniżej 4 w skali Mohsa, i ze wskazaniem na materiały włókniste i miękkie, również biomasę. W tym odniesieniu, jakie Doktorant zdobył doświadczenie w tych badaniach odnośnie powiększania skali wężła technologicznego rozdrabniania?
- Czy i w jaki sposób następuje odzysk chłodu, aby zapewnić stronę ekonomiczną procesu? Jakie jest zużycie ciekłego azotu na jednostkę masy płytek obwodów drukowanych?
- Zarówno w produkcji, jak i recyklingu płytek POD wprowadzane są innowacje. W badaniach Doktorant używał płytek – ogólnie mówiąc - wyprodukowanych na licencji firm amerykańskich w latach 2007-2009. Czy zaproponowana w zgłoszeniu patentowym P1 technologia recyklingu POD uwzględnia nowe podejście do projektowania płytek drukowanych łatwych do recyklingu?
- Nawiązując do jednego z wniosków końcowych n.t. uzyskanej wysokiej jakości koncentratu metali, czy mógłby Pan wskazać podmiot gospodarczy zainteresowany nabyciem i dalszym przetwarzaniem tego produktu?

#### Podsumowanie

Mgr inż. Dawid Franke wykazał się w pracy doktorskiej oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i technicznego recyklingu elektro sprzętu, ukierunkowanego na płytki obwodów drukowanych (POD). Temat rozprawy jest multidyscyplinarny, a kluczowe miejsce w badaniach zajmują dwie katedry PŚ, a mianowicie Katedra Promotora i Katedra Promotora Pomocniczego, wskazane na wstępie recenzji oraz Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Kompetencje Doktoranta w przedmiocie dysertacji są szczególnie widoczne w zrozumieniu podstaw fizykochemicznych operacji jednostkowych separacji elektrostatycznej i flotacji odwróconej a zarazem omówieniu wyników badań efektywności separacji. Zaproponowana procedura technologiczna pozwala odzyskiwać metale, a tym samym chronić środowisko przyrodnicze poprzez unikanie kosztów wydobycia, transportu, rozdrabniania i wzbogacania rud metali. Doceniam fotografie mikroskopowe proszku z rozdrabniania, pozwalające ocenić wstępnie stopień uwolnienia metali podczas mielenia w warunkach głębokiego schłodzenia.

Mgr inż. Dawid Franke z pewnością jest przygotowany do samodzielnej pracy naukowej i dobrze wpisywał się w zespół badawczy, wg roli którą pełnił jako kluczowy członek zespołu do programowania i wykonywania zadań badawczych z zakresu kilku operacji jednostkowych w procesie przerobu płytek drukowanych. Opanował rozwiązania technologiczne kluczowe dla wspierania zrównoważonego rozwoju przez maksymalizację odzysku surowców i minimalizację powstawania odpadów, a także poprawę efektywności procesów produkcyjnych i recyklingowych.

W tym odniesieniu, uznaję dysertację mgr inż. Dawida Franke za dojrzałą pracę naukową, która wnosi nowe wartości do technologii recyklingu płytek obwodów drukowanych. Przedstawione w pracy badania są metodologicznie poprawne, a uzyskane wyniki są ważne zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Zasygnalizowane w recenzji uwagi krytyczne mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej i praktycznej dysertacji.

Dysertacja mgr inż. Dawida Franke spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668). W tym odniesieniu stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o **dopuszczenie** mgr inż. Dawida Franke do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisał Jan Hupka