

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Pawła Friebe

pt. „Badania nad technologią odzysku metali ziem rzadkich ze zużytego sprzętu wyposażonego w magnesy NdFeB”

1. Podstawa formalna wykonania recenzji pracy

Przedmiotem recenzji jest praca pt. „Badania nad technologią odzysku metali ziem rzadkich ze zużytego sprzętu wyposażonego w magnesy NdFeB”, której Autorem jest mgr inż. Paweł Friebe. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Tomasz Suponik, profesor PŚ, promotorem pomocniczym Dr inż. Paweł Nuckowski i opiekunem naukowym Dr inż. Daniel Kowol. Podstawą formalno-prawną wykonania recenzji jest pismo nr RIE-BD.512.48.2025 z dnia 31.10.2025r. skierowane przez Przewodniczącego Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej Prof. dr hab. Krzysztofa Labusa zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 233/2025 z dnia 23 października 2025r.

2. Ogólna charakterystyka recenzowanej pracy: ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Recenzowana praca została przygotowana w Katedrze Geoinżynierii i Eksploatacji Surowców Wydziału Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej Politechniki Śląskiej w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” i liczy 126 stron. Składa się z streszczenia, wprowadzenia, części literaturowej, badawczej, dyskusji wyników badań, podsumowania i wniosków, a także spisu tabel, spisu rysunków i spisu cytowanej literatury. Spis literatury liczy 87 pozycji. Na początku pracy znajduje się spis oznaczeń i skrótów stosowanych w pracy, co ułatwia czytelnikowi poruszanie się po pracy. Kolejno znajduje się spis dziewięciu publikacji związanych z rozprawą doktorską, lista zgłoszeń patentowych: 3 zgłoszenia oraz lista pozostałych publikacji: 10, w których Doktorant jest Autorem lub współautorem. Dorobek naukowy Doktoranta oceniam na dość pokaźny. Wprowadzenie krótko charakteryzuje zagadnienie omawiane w pracy polegające na opracowaniu technologii odzysku metali

ziem rzadkich z zużytego sprzętu elektronicznego. Autor opisuje uzasadnienie podjętego tematu dotyczącego odzysku pierwiastków ziem rzadkich (REE) z zużytego sprzętu elektronicznego na bazie magnesów NdFeB. Przedstawia różne koncepcje odzysku REE oraz wskazuje na luki w metodach recyklingu niewielkich urządzeń tj. dyski twarde, słuchawki, głośniki, które zawierają niewielkie ilości magnesów neodymowych. Wskazuje na potrzebę opracowania zintegrowanej metody odzysku magnesów neodymowych z ZSEE, która pozwoliłaby na odzysk stopu NdFeB, aluminium, stali, tworzyw sztucznych i płyt obwodów drukowanych. Kolejno Doktorant definiuje cel i hipotezy badawcze.

W rozdziale 4 Autor opisał aktualny stan wiedzy nt. charakterystyki dysków twardych oraz ich składu pierwiastkowego, przegląd aktualnie stosowanych metod recyklingu oraz omówił wybrane procesy jednostkowe z obszaru inżynierii mineralnej, które zastosował do badań recyklingu HDD. Materiały i metody badawcze Doktorant opisał w rozdziale piątym, w którym przedstawił metody manualne i mechaniczne recyklingu zużytego sprzętu HDD. Do metod recyklingu mechanicznego wykorzystał metody rozdrabniania w zaprojektowanym dezintegratorze, separację magnetyczną pasywną i aktywną, klasyfikację na sitach, mielenie, separację grawitacyjną na stole koncentracyjnym oraz w separatorze powietrznym cyklofluidalnym, separację optyczną i elektrostatyczną. Zastosowanie tak szerokiego zestawu dostępnych metod recyklingu mechanicznego dowodzi przemyślanego doboru odpowiednich technik odzysku. Wykorzystanie uzupełniających procesów rozdrabniania, wieloetapowej separacji oraz klasyfikacji świadczy o kompleksowym i nowatorskim podejściu, które pozwala objąć szerokie spektrum właściwości materiałowych. Takie podejście w sposób jednoznaczny dowodzi zróżnicowania starannie dobranych metod ukierunkowanych na efektywny odzysk wysokiej czystości frakcji materiałowych: proszku stopu NdFeB, odrębnych strumieni stali ferromagnetycznej, stali nierdzewnej, aluminium, mieszaniny metali, mieszaniny tworzyw sztucznych i cząstek płyt obwodów. Następnie Autor opisał wykorzystane materiały i metody analityczne stosowane w celu określenia jakości wydzielonych produktów materiałowych, do których należą: analiza XRD, XRF, ICP-AES, obserwacje mikroskopowe, analiza obecności materiałów nieferromagnetycznych. W kolejnych podrozdziałach przeprowadził analizę wydajnościową, finansową, a także dokonał oceny oddziaływań środowiskowych, obejmujących określenie poziomu hałasu oraz zapylenia. W moim odczuciu zakres tematyczny tych analiz jest bardzo szeroki, co skutkuje nadmiernym nagromadzeniem różnorodnych zagadnień i podrozdziałów (numeracja kończy się na podrozdziale 5.2.2.11) w obrębie jednego rozdziału.

Rozdział szósty poświęcony jest wynikom badań i dyskusji, w którym przedstawione są osiągnięte rezultaty badań nad recyklingiem sprzętu elektronicznego wyposażonego w magnesy NdFeB. Autor pokazuje osiągnięte rezultaty recyklingu manualnego, polegającego na rozkręcaniu i rozwiercaniu poszczególnych elementów składowych HDD w aspekcie potrzebnego czasu, wydajności i

jednostkowego kosztu demontażu. W kolejnych podrozdziałach Autor przedstawia wyniki poszczególnych procesów jednostkowych jak rozdrabnianie w dezintegratorze, separacja magnetyczna pasywna, demagnetyzacja termiczna, mielenie, separacja magnetyczna aktywna, klasyfikacja mechaniczna i metody wzbogacania grawitacyjnego, separacja optyczna, elektrostatyczna, za każdym razem podając odpowiednio charakterystykę czystości otrzymanych produktów, parametry operacyjne i narzędzia oceny dedykowane dla każdego procesu jednostkowego. W tym rozdziale Doktorant przedstawił również analizę kosztów recyklingu zaproponowanej technologii oraz jej wpływu na środowisko naturalne. Praca kończy się rozdziałem podsumowującym i wnioskami końcowymi.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Doktorant jest autorem samodzielnym w 5-ciu publikacjach, współautorem w 4-ech publikacjach bezpośrednio związanych z tematem pracy doktorskiej, współautorem 3-ech zgłoszeń patentowych oraz współautorem w 10-ciu publikacjach pozostałych. Stanowi to ponadprzeciętny wkład w działalność naukową Doktoranta, szczególnie dla doktoratów wdrożeniowych.

Spis literatury w ramach rozprawy doktorskiej liczy 87 pozycji, w tym artykuły naukowe, monografie, książki i inne opracowania oraz branżowe serwisy internetowe. **Oceniam, że liczba i dobór literatury są adekwatne do zakresu pracy.**

4. Ocena istotności i celowości podjętego tematu

Dynamiczny rozwój technologii elektronicznych prowadzi do systematycznego wzrostu ilości zużytego sprzętu elektronicznego (ZSE), który stanowi jednocześnie istotne zagrożenie środowiskowe oraz cenne źródło surowców wtórnych. W szczególności ZSE zawiera metale o wysokiej wartości ekonomicznej, w tym metale krytyczne i metale ziem rzadkich, których pozyskiwanie ze źródeł pierwotnych wiąże się z wysokimi kosztami energetycznymi i środowiskowymi. Z tego względu rozwój efektywnych technologii recyklingu ZSE jest obecnie jednym z kluczowych wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym.

Na podstawie przyjętego celu pracy oraz określonego zakresu badań uważam, że podjęty temat rozprawy doktorskiej ma charakter nie tylko aktualny, lecz również narastający w skali, a jego znaczenie będzie w coraz większym stopniu dotyczyć szerokiej grupy konsumentów. Odnosi się do istotnego problemu badawczego, oferując jednocześnie praktyczne podejście do jego rozwiązania.

Praca dotyczy opracowania koncepcji technologicznej recyklingu zużytego sprzętu elektronicznego w podejściu dwuwariantowym: manualnym i mechanicznym. Zastosowanie dwóch wariantów umożliwia porównanie efektywności procesów prowadzonych na różnych poziomach zaawansowania technologicznego, a także ocenę zasadności ich zastosowania w zależności od skali

przetwarzania, stopnia złożoności odpadów elektronicznych oraz wymagań ekonomicznych i środowiskowych. W wariancie manualnym zastosowano typowe metody polegające na demontażu ręcznym z wykorzystaniem dostępnych narzędzi. W wariancie mechanicznym Autor zastosował procesy jednostkowe, które powszechnie stosuje się w inżynierii mineralnej do separacji surowców mineralnych. W pracy wykorzystano metody takie jak: rozdrabnianie, mielenie, klasyfikację mechaniczną, separację magnetyczną pasywną i aktywną, demagnetyzację termiczną, separację grawitacyjną, elektrostatyczną, cyklofluidalną i optyczną. Takie wieloaspektowe podejście do problemu jest uzasadnione faktem, iż zużyty sprzęt elektroniczny, po odpowiednim rozdrobnieniu, może być traktowany jako antropogeniczny surowiec mineralny o złożonym składzie fazowym i granulometrycznym. Procesy rozdrabniania, mielenia i przesiewania były wykorzystane w celu uwolnienia faz metalicznych i niemetalicznych oraz uzyskania odpowiedniego uziarnienia materiału do dalszych operacji.

Separacja magnetyczna, prowadzona w trybie pasywnym i aktywnym, została wykorzystana do wydzielania składników ferromagnetycznych i paramagnetycznych. Separacja grawitacyjna umożliwiła rozdział frakcji aluminiowej od mieszaniny płytek drukowanych PCB oraz tworzyw sztucznych o rozmiarze 10-25 mm. Zastosowanie separacji cyklofluidalnej dla klasy ziarnowej 3,15-10,0 mm pozwoliło rozdzielić aluminium od mieszaniny PCB i tworzyw sztucznych. Separacja optyczna wykonana dla dwóch klas ziarnowych: 3,15-10 oraz 10,0-25,0 mm po wcześniejszym rozdziale metodami grawitacyjnymi, w postaci ziaren niemetalicznych pozbawionej aluminium, umożliwiła dodatkowo precyzyjny rozdział PCB od tworzyw sztucznych. Separacja elektrostatyczna umożliwiła wydzielenie metali i tworzyw sztucznych o uziarnieniu $< 3,15$ mm.

Zastosowany zestaw metod umożliwił kompleksową ocenę możliwości adaptacji klasycznych procesów inżynierii mineralnej do przetwarzania zużytego sprzętu elektronicznego, a tym samym na opracowanie spójnej koncepcji technologicznej jego recyklingu. Tak szeroki wachlarz zastosowanych technik pozwolił na wieloaspektową ocenę potencjału technologicznego badanych procesów. Uzyskane wyniki mają istotne znaczenie, gdyż stanowią wartościowy wkład w rozwój badań nad gospodarką o obiegu zamkniętym.

5. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Podstawę części eksperymentalnej stanowiły doświadczenia laboratoryjne prowadzone według zaplanowanego schematu badawczego, ukierunkowanego na uzyskanie możliwie czystych produktów recyklingu. W ramach identyfikacji i charakterystyki materiałowej zastosowano nowoczesne metody analityczne, takie jak dyfrakcja rentgenowska (XRD), fluorescencja rentgenowska (XRF) oraz spektrometria emisyjna z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (ICP-AES), co umożliwiło wiarygodną ocenę składu fazowego i chemicznego otrzymanych materiałów.

Uzupełnieniem badań laboratoryjnych było określenie wydajności prowadzonych procesów, pozwalające na ilościową ocenę ich efektywności. W pracy przeprowadzono również analizę finansową, obejmującą zestawienie kosztów recyklingu manualnego i mechanicznego, co umożliwiło porównanie obu podejść z punktu widzenia ekonomicznego. Dodatkowo uwzględniono pomiary poziomu hałasu oraz zapylenia, istotne z perspektywy warunków pracy i bezpieczeństwa procesów technologicznych.

Całość badań została uzupełniona analizą wpływu rozpatrywanych metod recyklingu na środowisko, co wpisuje się w charakter pracy wdrożeniowej i pozwala na wieloaspektową ocenę proponowanych rozwiązań. Zastosowany zestaw metod badawczych należy uznać za spójny i adekwatny do realizacji celu pracy, a ich komplementarność umożliwiła ocenę zagadnienia zarówno w wymiarze technologicznym, jak i ekonomicznym oraz środowiskowym. **Dobór zastosowanych metod badawczych oceniam pozytywnie, jako właściwy i uzasadniony z punktu widzenia celu rozprawy, a ich realizacja została przeprowadzona prawidłowo, z zachowaniem zasad dokładności, rzetelności i poprawności metodologicznej prac naukowych.**

6. Ocena rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Część rozprawy poświęcona prezentacji i omówieniu wyników badań została opracowana w sposób uporządkowany i czytelny. Zastosowane metody badawcze o charakterze doświadczalnym są adekwatnie dobrane do przyjętego celu pracy wdrożeniowej oraz umożliwiają ocenę praktycznych aspektów analizowanego zagadnienia. Wyniki badań zostały przedstawione w formie tabelarycznej, co sprzyja ich przejrzystości oraz ułatwia porównanie uzyskanych wartości, zaprezentowane rysunki są graficznym dopełnieniem analiz. Omówienie wyników w sposób zasadniczy odnosi się do przeprowadzonych eksperymentów. Wnioski końcowe są zgodne z przedstawionym omówieniem wyników. **Podsumowując, część rozprawy doktorskiej dotycząca omówienia wyników badań została przygotowana na wysokim poziomie merytorycznym i stanowi istotny element realizacji celów badawczych pracy.**

7. Ocena wartości naukowej i aplikacyjnej pracy

Przedstawiona koncepcja technologiczna recyklingu zużytego sprzętu wyposażonego w magnesy neodymowe w celu odzysku metali ziem rzadkich została opracowana na bazie doświadczeń laboratoryjnych. Dla zaproponowanej technologii wykonano ocenę efektywności z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego i środowiskowego. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, iż w badaniach zaprezentowanych w rozprawie Doktorant wykorzystał opatentowane urządzenie do rozdrabniania, opracowany według autorskiej koncepcji tj. dezintegrator nożowy wyposażony w noże tnące wykonane z materiałów paramagnetycznych. **Zastosowanie własnego, chronionego prawnie**

rozwiązania technicznego stanowi istotny element oryginalnego wkładu Autora w rozwój technologii przetwarzania zużytego sprzętu elektronicznego. Fakt zastosowania opatentowanego urządzenia własnego pomysłu znacząco podnosi wartość naukową i aplikacyjną rozprawy, potwierdzając samodzielność badawczą Doktoranta oraz jego zdolność do twórczego łączenia zagadnień teoretycznych z praktyką inżynierską.

Wartość aplikacyjna pracy wynika z praktycznego charakteru zaproponowanych rozwiązań, ich weryfikacji w warunkach zbliżonych do przemysłowych oraz potencjału wdrożeniowego ocenionego na 4 poziom gotowości technologicznej. Opracowana technologia wpisuje się w aktualne potrzeby gospodarki o obiegu zamkniętym i potwierdza zasadność realizacji rozprawy w formule doktoratu wdrożeniowego.

Do oryginalnych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- opracowanie komplementarnej technologii odzysku stopu metali ziem rzadkich oraz pozostałych elementów składowych z dysków twardych,
- odzysk wysokiej czystości stopu metali ziem rzadkich, stali ferromagnetycznej, stali nierdzewnej, aluminium, mieszaniny drobno uziarnionych metali, tworzyw sztucznych, które mogą być ponownie wykorzystane,
- wykorzystanie metod manualnych i mechanicznych do recyklingu, co pozwala uniknąć tradycyjnie stosowanych metod chemicznych,
- zaprojektowanie technologii w całym ciągu bez użycia wody, a co za tym idzie wyeliminowanie konieczności odwadniania i suszenia otrzymanych produktów,
- analizę zużycia energii, emisji hałasu i zapylenia w poszczególnych etapach recyklingu,
- analizę recyklingu manualnego w kontekście porównania efektywności ekonomiczno-wydajnościowej dwóch metod demontażu, tj. rozwiercania oraz rozkręcania, obejmujące ocenę nakładów kosztowych i czasochłonności procesu,
- skalkulowanie kosztów zużycia energii, emisji pyłu, poziomu hałasu oraz całkowitych kosztów recyklingu.

Dobór zastosowanych metod badawczych w pracy jest adekwatny do sformułowanych hipotez, a ich realizacja została przeprowadzona prawidłowo, z zachowaniem zasad staranności, rzetelności i poprawności metodologicznej prac naukowych.

8. Uwagi krytyczne

Rozprawę doktorską oceniam pozytywnie, mam jednak kilka uwag/pytań do prezentowanych treści.

5.1. Uwagi merytoryczne

- Hipotezy badawcze formułuje się w formie twierdzącej: „umożliwia”, „jest”, „prowadzi do”, a nie opisowej: „umożliwi”, „okaże się”, „będzie”,
- w pracach naukowych nie stosuje się pojęcia „krzywe przesiewania” (str. 29 w pracy), właściwym i zalecanym terminem jest „krzywe składu ziarnowego”,
- proszę doprecyzować stosowane pojęcia: „Natomiast stal (...) cechuje się wyższą ciągliwością i udarnością, przez co opiera się rozdrabnianiu przez krótki czas” – str. 53 oraz „... co świadczy o kruchym mechanizmie rozdrabniania...” – str. 90,
- str. 72 brak komentarza do wykresu Sankeya: rys. 6.2 nt. które konkretnie strumienie materiałowe są newralgiczne lub wymagają optymalizacji. Bardziej przydatny byłby bilans masowy strumieni materiałowych, gdyby Autor uwzględnił te wartości na schemacie blokowym dotyczącym recyklingu zużytych dysków HDD na rys. 5.1 na str. 35 lub zaprezentował schemat ilościowo-jakościowy albo przynajmniej ilościowy jako rezultat swoich badań w pracy,
- czym różniły się między sobą nadawa 1 (zawierająca 31 dysków HDD) i nadawa 2 i 3 (zawierające po 30 dysków HDD) użyte w doświadczeniach?
- Autor omawiając wyniki doświadczeń w rozdziale 6. stosuje pojęcie „*wychodu frakcji*” w odniesieniu do wartości wyrażonych w gramach oraz „*udziału frakcji*” wyrażonych w procentach. Przy czym w tabelach: 6.9; 6.12; 6.14; 6.28; 6.30; 6.32 i 6.33 „Średni wychód produktu” podany jest w „%”. Z kolei w tabeli 5.2. na str. 38 termin „udział” odnosi się do składu chemicznego proszku. W inżynierii mineralnej i recyklingu termin *wychód* odnosi się do wielkości względem, której jest liczony tj. względem nadawy. Wychód dotyczy efektywności ilościowej procesu i określa, jaka część teoretycznie możliwej lub wejściowej ilości materiału została faktycznie uzyskana w wyniku danego procesu rozdzielczego w stosunku do nadawy. *Udział* oznacza część danej wielkości w całości albo jaki odsetek danego składnika występuje w zbiorze odniesienia lub gdy dany materiał powstaje z kilku zmieszanych składników wyjściowych. Proszę o doprecyzowanie sposobu rozumienia i stosowania pojęć „wychód, g” i „udział, %” użytych w pracy, gdyż w obecnej postaci ich interpretacja jest niejednoznaczna.
- na str. 87 Autor omawia wyniki mielenia zestawione w tabeli 6.20 posługując się m.in. wskaźnikiem d_{90} . Do omawiania wyników użył stwierdzenia „świadczy to o znacznej redukcji średniej wielkości

cząstek.....” omawiając wartości ziarna 90-cio% po mieleniu. Proszę doprecyzować, co Autor miał na myśli pisząc o redukcji średniej wielkości cząstek,

- na str. 88 Doktorant interpretuje wyniki rozdrabniania, a konkretnie wskaźnik S_{50} w oparciu o tabelę 6.21, przy czym powołane wartości wskaźnika „34,9 po 0,5 h do 155,3 po 15 h” są odmienne od tych pokazanych w tabeli 6.21,

- w oparciu o jakie wytyczne przyjęto odległość wałów w dezintegratorze równą 10,5 mm w doświadczeniach?

- czy i w jakim stopniu rodzaj zastosowanych mielników w młynie planetarnym mógł wpłynąć na zawartość Fe w mielonym materiale?

- proszę wyjaśnić w jaki sposób obliczano średnie odchylenie standardowe dla wyników doświadczeń, mam na myśli jak liczna była próbka? Ponadto w tabelach: 6,9; 6.12; 6.14; 6.28; 6,30; 6.32 i 6.33 w nagłówku tabeli tytuł jednej z kolumn brzmi: „Średni wychód produktu, %”, natomiast wartość w komórce wskazuje, że obliczenia wykonano dla wartości „Udział, %”. Zatem dla jakiego parametru obliczano odchylenie standardowe i w jakim celu? W pracy brakuje interpretacji obliczonych wartości odchylenia standardowego.

5.1. Uwagi edytorskie:

- w pracach naukowych przy cytowaniu publikacji wieloautorских (trzech i więcej autorów) w tekście stosuje się zapis w postaci nazwiska pierwszego autora oraz zwrotu „i inni”. Cytowanie pozycji [38] na str. 24 wskazuje, że jest dwóch autorów publikacji, a w spisie cytowanej literatury wymienionych jest trzech autorów,

- rozdział 5.2.2. Metody analityczne i pomiarowe zawiera 11 podrozdziałów od „5.2.2.1. XRD” do 5.2.2.11. Zapylenie”, co uważam za zbyt rozbudowaną strukturę, tym bardziej, że niektóre podrozdziały są trzyzdaniowe jak np. podrozdział: 5.2.2.2., 5.2.2.5., 5.2.2.6, 5.2.2.7 i 5.2.2.8, co niepotrzebnie wydłuża numerację i listę podrozdziałów. Moim zdaniem Autor powinien zewrzeć w spójny tekst krótkie podrozdziały,

- w pracy używane są zwroty zaliczane do błędów językowo-stylistycznych jak „będzie mógł być” - str. 13 oraz żargonowych: „przeprowadzono ponownie klasyfikację na sicie o oczku 2 mm” – str. 80 powinno być „...na sicie o wielkości oczka 2 mm”, „skierowany następnie na klasyfikację granulometryczną” – str. 115 powinno być: „...do procesu klasyfikacji...”,

- Autor używa sformułowań: „na podstawie wcześniejszych badań naukowych...” – str. 92, „...potwierdzają dostępne źródła literaturowe...” – str. 99, bez powołania na te źródła,

- proszę wyjaśnić która próbka jest próbką nr 8 – str. 102.

9. Ocena końcowa

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa przedstawiona do recenzji stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant podejmując zadanie badawcze wykazał się umiejętnością definiowania problemów badawczych, prowadzenia badań oraz wykonywania analiz otrzymanych wyników. Ponadto Doktorant wykazał się dużą wiedzą praktyczną i inżynierskim podejściem do zaplanowania i wykonania doświadczeń. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że Doktorant zaprojektował i był głównym wykonawcą urządzenia do rozdrabniania odpadów elektronicznych, które niełatwo poddają się klasycznym metodom rozdrabniania, tj. dezintegratora nożowego, a zaproponowane rozwiązanie zostało zgłoszone do UP RP. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, stanowi samodzielne rozwiązanie problemu, a Doktorant wykazał się dobrym poziomem wiedzy teoretycznej i doskonałymi umiejętnościami inżynierskimi w dyscyplinie naukowej. Mgr inż. Paweł Friebe dowiódł tym samym, że spełnia wymagania do otrzymania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Pawła Friebe pt. „Badania nad technologią odzysku metali ziem rzadkich ze zużytego sprzętu wyposażonego w magnesy NdFeB” w pełni spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Uzasadnianie propozycji wyróżnienia rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Friebe

Praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny oraz znaczący potencjał aplikacyjny. Rozprawa doktorska wyróżnia się starannie zaplanowaną koncepcją badawczą oraz wysokim poziomem realizacji części doświadczalnej. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań laboratoryjnych oraz właściwego doboru metod badawczych, charakterystycznych dla podejścia inżynierskiego. Opracowany przez Doktoranta zintegrowany schemat blokowy mechanicznego recyklingu zużytych dysków twardych HDD 3,5" w układzie magnet-to-magnet, prowadzący do otrzymania proszku stopu NdFeB oraz odrębnych strumieni stali ferromagnetycznej, stali nierdzewnej, aluminium, mieszaniny metali, mieszaniny tworzyw sztucznych i cząstek płyt obwodów stanowi oryginalne osiągnięcie. Doktorant wykazał doskonałe przygotowanie do realizacji szerokiej tematyki badawczej. Potwierdzeniem praktycznego charakteru i innowacyjności prowadzonych badań są trzy

zgłoszenia patentowe dotyczące opracowanych technologii odzysku ziem rzadkich z zużytego sprzętu wyposażonego w magnesy neodymowe, a także autorski projekt dezintegratora do rozdrabniania. Na szczególne uznanie zasługuje przyjęte w pracy podejście inżynierskie oraz twórcze wykorzystanie metod typowych dla inżynierii mineralnej w obszarze recyklingu odpadów. W szczególności warto podkreślić zastosowanie stołu koncentracyjnego do prowadzenia procesu separacji na sucho, co stanowi interesujące i niestandardowe rozszerzenie zakresu wykorzystania tego typu urządzenia, tradycyjnie stosowanego w procesach mokrych dla surowców naturalnych. Takie podejście świadczy o innowacyjnym charakterze zaproponowanych rozwiązań oraz o umiejętności adaptacji sprawdzonych metod technologicznych do nowych obszarów zastosowań. Dodatkowo dorobek publikacyjny (9 publikacji związanych z tematyką rozprawy doktorskiej i 10 pozostałych publikacji) świadczy o aktywności naukowej Autora oraz o znaczeniu uzyskanych wyników dla dalszego rozwoju badań w obszarze recyklingu i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Z uwagi na oryginalność podejścia badawczego, wysoki poziom wykonania prac doświadczalnych oraz istotny wkład aplikacyjny uważam, że rozprawa w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Podpisała Agnieszka Surowiak