

Zabrze, 20/10/2025r.

Prof. dr hab. inż. Jarosław Zuwała
Z-ca Dyrektora Instytutu ds. Badań i Rozwoju

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida SOJKI
pt. „*Opracowanie technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych z wykorzystaniem termicznych i fizykochemicznych metod przeróbczych w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym*”

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Pikoń (Politechnika Śląska)
Opiekun pomocniczy: dr inż. Katarzyna Klejnowska (Sieć Badawcza Łukasiewicz – IMN)

1. Wprowadzenie

Podstawą formalną opracowania recenzji jest umowa o dzieło zawarta pomiędzy Politechniką Śląską a autorem niniejszej recenzji. Recenzja przygotowana jest w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 209/2025 z dnia 25.09.2025 r. oraz Ustawę z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2024 r., poz. 1571 z późn. zm.). Recenzja opracowana została na podstawie otrzymanej w dniu 09.10.2025 r. rozprawy doktorskiej, stanowiącej opracowanie zwarte.

2. Sylwetka Doktoranta

Autor recenzowanej rozprawy doktorskiej, Pan Dawid Sojka uzyskał:

- w 2013 roku tytuł inżyniera na kierunku Górnictwo i Geologia prowadzonym na owoczesnym Wydziale Górnictwa i Geologii (obecnie Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej) Politechniki Śląskiej w Gliwicach.
- w 2015 roku tytuł magistra inżyniera w specjalizacji Eksploatacja Złóż i Zagospodarowanie Odpadów, prowadzonym na kierunku Górnictwo i Geologia na owoczesnym Wydziale Górnictwa i Geologii (obecnie Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej) Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Zgodnie z uzyskaną informacją, Doktorant nigdy wcześniej nie ubiegał się o nadanie stopnia doktora w żadnej jednostce organizacyjnej, a przedłożona rozprawa doktorska nie była przedmiotem innego postępowania.

Pan Dawid Sojka w latach 2018-2019 odbył studia podyplomowe: Inżynieria procesów odlewniczych i obróbki plastycznej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

W 2021 roku rozpoczął naukę w Szkole Doktorów Politechniki Śląskiej w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Jest autorem między innymi sześciu publikacji w czasopiśmie naukowych na liście MNiSW. Samodzielnie prowadził 6 prac badawczych finansowanych z subwencji. Uczestniczył w pięciu projektach badawczych oraz dziesięciu konferencjach naukowych w kraju oraz za granicą. Jest głównym autorem zgłoszenia patentowego, będącego rezultatem pracy doktorskiej.

Od roku 2015 pracuje w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach, który od 2019 roku wchodzi w skład Sieci Badawczej Łukasiewicz. Doktorant obecnie pracuje na stanowisku starszego specjalisty w Grupie Badawczej Surowców Wtórnych, należącej do Centrum Hutnictwa. Zajmuje się pracami badawczymi związanymi z

Gospodarką o Obiegu Zamkniętym, przeprowadzaniem obliczeń śladu węglowego oraz analizy cyklu życia. Od roku 2023 pracuje jako asystent naukowo – badawczy na Wydziale Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej, gdzie prowadzi zajęcia dydaktyczne.

3. Ogólna ocena rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W bieżącym punkcie dokonam zwięzłego podsumowania treści rozprawy oraz ocenę prawidłowości wyboru jej tematyki.

3.1 Zakres i struktura rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została zrealizowana w Szkole Doktorskiej prowadzonej w Politechnice Śląskiej pod opieką promotora i opiekuna pomocniczego, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Praca poświęcona jest badaniom nad możliwościami odzysku surowców z kabli żelowych oraz analizie możliwości ich ponownego wykorzystania zgodnie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym, szczególny nacisk położony został na jeden z komponentów kabli żelowych, jakim jest żel hydrofobowy.

Rozważania zawarte w rozprawie zostały podzielone na dwie części. Część pierwsza (wprowadzająca) podkreśla znaczenie pracy w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym i zawiera analizę rynku krajowych producentów kabli (w tym żelowych). W niej również Doktorant omawia wyniki przeprowadzonego przeglądu stanu techniki w zakresie istniejących rozwiązań z zakresu recyklingu kabli żelowych, wskazując na istotne ograniczenia opracowanych dotychczas rozwiązań, najważniejszym z nich jest brak możliwości odzysku jednego ze składowych surowców kabli żelowych jakim jest sam żel hydrofobowy. Drugą część pracy stanowi opis badań zrealizowanych przez Doktoranta, na które złożyły się analizy laboratoryjne o szerokim zakresie, porównawcze analizy wariantowe dla wybranych metod odzysku surowców z odpadowych kabli oraz ocena cyklu życia (LCA) dla analizowanych wariantów technologicznych.

W przeprowadzonej dyskusji otrzymanych wyników nacisk położony został na wykazanie, iż możliwe jest takie prowadzenie procesu recyklingu aby stopień odzysku żelu hydrofobowego wynosił co najmniej 90% oraz że odzyskany surowiec może być wciąż traktowany jako pełnowartościowy produkt do ponownego zastosowania (co potwierdzono odnosząc uzyskane parametry do wielkości podanych w normie PN-EN 60247).

Tytuł pracy wskazuje, iż jako jej ostateczny rezultat zaplanowano „*opracowanie technologii odzysku surowców [...]*”, co wyraźnie wskazuje na jej oczekiwany efekt użytkowy. Tematyka rozprawy mieści się w obszarze przedmiotowej dyscypliny. Uzasadnienie wyboru tematu zawarto w podpunktach 1.3 i 1.4 (odpowiednio zatytułowanych *Kontekst Gospodarka o Obiegu Zamkniętym w recykling kabli miedzianych* (pisownia oryginalna) oraz *Żel hydrofobowy zawarty w kablach żelowych*).

Rozprawę Doktorant zawarł na 183 stronach. Praca jest bardzo bogata w liczne formy graficzne (tabele, rysunki, schematy), zawiera ułatwiające lekturę spisy oznaczeń, tabel oraz rysunków. Manuskrypt podzielono na dziewięć głównych numerowanych rozdziałów, obejmujących zasadniczą część pracy. Po rozdziale 9 umieszczona została *Bibliografia*, która obejmuje 86 pozycji. Cytowane źródła są aktualne, powiązane merytorycznie z tematyką pracy, przeważający udział cytowanych prac pochodzi z ostatnich lat. Pozycje bibliograficzne podano w kolejności ich cytowania a odwołania do nich mają pełne uzasadnienie w treści rozprawy. Sposób oznaczenia cytowań źródeł literatury jest zgodny ze stylistyką stosowaną w naukowej literaturze technicznej. Praca zawiera załączniki: załącznik 1 (zawierający szczegółowe wyniki przeprowadzonych testów pirolizy poszczególnych rodzajów kabli żelowych) oraz załącznik 2 (wyniki uzyskane na poszczególnych etapach prowadzenia analizy LCA dla Metody III). Moim zdaniem, dla wygody bieżącego odnoszenia się do informacji zawartych w *Bibliografii* i załącznikach w trakcie lektury pracy można było umieścić te rozdziały odwrotnie: w pierwszej załączniki a na końcu pracy spis literatury. Praca zawiera wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim.

Pracę rozpoczyna nienumerowany rozdział *Cel i zakres pracy*, gdzie zgodnie z tytułem Autor wskazuje cel naukowy rozprawy jakim jest „*badanie wielowariantowych możliwości odzysku surowców z odpadowych kabli*

żelowych w warunkach laboratoryjnych". Celem wdrożeniowym pracy było *opracowanie kompleksowej technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych*. Zakres pracy objął badania morfologii wybranych do analiz kabli żelowych, ich właściwości fizycznych oraz wariantowe badania możliwości odzysku surowców w warunkach laboratoryjnych wraz z analizą jakości produktów. W tym rozdziale Autor wskazuje sześć hipotez badawczych, które postawił na początku pracy i które zamierza na podstawie własnych badań poddać weryfikacji (potwierdzeniu bądź obaleniu). Oceny hipotez dokonać można z następujących punktów widzenia: a) jasności sformułowania, b) weryfikowalności empirycznej, c) falsyfikowalności, d) oryginalności naukowej oraz e) spójności logicznej. Prowadzi ona do następujących wniosków: ad a): jasność sformułowań jest dobra (hipotezy sformulowano w sposób zrozumiały); ad b): weryfikowalność empiryczna pozostaje na poziomie średnim (hipotezy 1 i 3 sformulowano bardziej opisowo – przykładowo ta ostatnia jest trudna do empirycznej weryfikacji – to raczej konstatacja o zgodności z polityką GOZ, a nie teza badawcza), ad c): falsyfikowalność pozostaje na dobrym poziomie (zwłaszcza w przypadku hipotez 2, 4, 6), ad d): oryginalność naukowa jest dobra (tematyka wpisująca się w GOZ jest innowacyjna), ad e): spójność logiczna jest dobra – wszystkie hipotezy odnoszą się do jednego celu głównego. Podsumowując: zaproponowane w pracy doktorskiej hipotezy stanowią wartościowy zestaw łączący aspekty technologiczne, surowcowe oraz środowiskowe.

Kolejny nienumerowany rozdział to *ogólna koncepcja badań i plan pracy*, gdzie w sposób syntetyczny streszczona została zawartość poszczególnych numerowanych rozdziałów.

Rozdział 1 *Wprowadzenie* obejmuje analizę rynku krajowych producentów kabli żelowych. Wielkość produkcji kabli i przewodów w Polsce zwiększa się rok do roku, za wyjątkiem spadku wielkości produkcji w roku 2020 (pandemia COVID-19). Kable żelowe (stanowiące przedmiot zainteresowania Doktoranta) zaliczają się do kabli telekomunikacyjnych, których udział w całkowitej wielkości sprzedaży spada jednak z uwagi na coraz większą popularność kabli światłowodowych, które stanowią dla kabli żelowych alternatywę. W dalszej części rozdziału omówiona jest kwestia recyklingu odpadowych kabli miedzianych, z analizą porównawczą stosowanych technik ich rozdrabniania oraz rozdzielania poszczególnych frakcji. Istotnym wnioskiem płynącym z przeprowadzonej analizy jest nieprzydatność tradycyjnych metod recyklingu dla kabli żelowych. Z uwagi na właściwości żel hydrofobowego, stanowiącego komponent kabli żelowych zagadnienie recyklingu kabli żelowych oraz odzysku samego żel jest skomplikowane. Autor w bieżącym rozdziale dokonał analizy stanu techniki z obszaru recyklingu kabli żelowych, w efekcie której sformułował wartościowe wnioski, m.in. „istnieje potrzeba opracowania technologii pozwalającej na otrzymanie produktów o czystości miedzi 99,9% i odseparowaniu żel hydrofobowego na poziomie powyżej 90%).

Rozdział 2 to *przedmiot i metodyka badań*. Autor proponuje do swoich badań cztery rodzaje kabli żelowych, które są najpopularniejsze w Polsce (ich sprzedaż zarówno pod względem masy jak i długości jest największa). Przyjęte do badań kable poddawane są ocenie morfologicznej, wyznaczany jest m.in. udział żel hydrofobowego w każdym z kabli. Wzór (1) na str. 43 wyraża jednak bardziej sumaryczną masę żel dla wszystkich badanych kabli niż stanowi udział żel w morfologii kabla, tak jak definiuje to Autor w opisie dla równania (1). Dla matematycznej poprawności, przy symbolu „sigma” w tym samym wzorze winny znaleźć się jeszcze: indeks sumowania a także dolna i górna granica sumowania. Zawartość masowa żel hydrofobowego w badanych próbach kabli zawierała się w przedziale 5-10%.

Rozdział 3 *Badania wstępne* obejmuje analizy właściwości fizykochemicznych kabli żelowych, w tym analizy DTA/TG, granulację oraz ocenę straty żel podczas cięcia kabli. Autor przeprowadził też badania kriogeniczne (mrożenie w ciekłym azocie i rozdrabnianie) oraz pirolizę w 600°C, w efekcie której uzyskał frakcję stałą, ciekłą i gazową. Analizy chromatograficzne i termiczne wykazały, że olej pirolityczny ma wysoką wartość opałową, a odzyskane frakcje nadają się do energetycznego wykorzystania. Rozdział ma charakter diagnostyczny i stanowi solidną podstawę pod opracowanie metod recyklingu.

Rozdział 4 – *Badanie możliwości odzysku surowców z kabli żelowych* obejmuje laboratoryjną symulację procesu recyklingu kabli żelowych. Autor opracował trzy koncepcje separacji: za pomocą gorącej wody (Metoda I), gorącego powietrza (Metoda II) oraz ekstrakcji rozpuszczalnikowej (Metoda III). Każda z metod została przetestowana dla wszystkich badanych kabli i ich zmiennych stopni rozdrobnienia. Wykazano, że uzyskany metal (miedź) osiąga czystość 99,9%, a tworzywa mogą być ponownie przetwarzane. Rozdział ten stanowi kluczowy

etap badań — autor weryfikuje praktyczną możliwość odzysku surowców i pokazuje, że ich rozdział jest technologicznie wykonalny. Dobrze zaprojektowane eksperymenty potwierdzają założenia hipotezy nr 2 i nr 4.

W rozdziale 5 pt. *Poprawa efektywności opracowanych technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych* ponownie jako bazowe omówiono trzy metody: metodę I (wykorzystującą gorącą wodę) — polegała ona na wymywaniu żeluz i oddzieleniu pozostałych frakcji; efektywność odzysku ok. 30%, metodę II (wykorzystującą gorące powietrze), pozwalała ona na termiczne odparowanie żeluz i cechowała się niższą energochłonnością i wyższą czystością metalu oraz metoda III (rozpuszczalnikowa z użyciem heksanu) — dała ona najlepsze rezultaty: odzysk żeluz do poziomu 90%, zgodny z normą PN-EN 60247, potwierdzający możliwość jego ponownego użycia. Niniejszy rozdział ma wysoką wartość badawczą i aplikacyjną. Zawiera solidne porównanie technologiczne i środowiskowe metod, a wybór heksanu jako rozpuszczalnika jest dobrze uzasadniony. Wyniki dowodzą efektywności opracowanej technologii i spełnienia hipotez głównych.

Rozdział 6 *Analiza cyklu życia (LCA)* zawiera omówienie przeprowadzonej dla trzech analizowanych metod separacji oceny LCA z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro. Porównano wskaźniki emisji, zużycia energii, wody, ekotoksyczności i globalnego ocieplenia. Najlepsze wyniki osiągnęła wskazana w poprzednim rozdziale jak optymalna metoda III, charakteryzująca się najniższym śladem środowiskowym i brakiem przekroczeń emisji gazów (CO, NO_x, SO₂). Rozdział znacząco wzmacnia wiarygodność uzyskanych wyników badań doświadczalnych — ocena LCA potwierdza, że technologia jest zgodna z zasadami GOZ. Zaprezentowanie pełnych zestawów uzyskanych wyników (tabel) w tym m.in. wartości przeprowadzonych normalizacji dla emisji uwiarygadnia przeprowadzoną analizę. Rozdział jest wartościowy, istotnie podnosi wartość pracy, uzyskane wnioski spójne są z wcześniejszymi częściami.

Ważnym z punktu widzenia przyszłych aplikacji jest rozdział 7 *Korzyści z opracowanej technologii*. Autor zestawia w nim i porównuje efekty technologiczne, środowiskowe i ekonomiczne. Proponowana jako docelowa technologia recyklingu pozwala odzyskać ponad 90% żeluz, 99,9% miedzi i 95% tworzyw sztucznych, przy jednocześnie zmniejszeniu ilości odpadów do niezbędnego minimum. Koszt laboratoryjny odzysku 1 kg żeluz został oszacowany i uznany za konkurencyjny. Niniejszy rozdział ma charakter syntetyzujący o charakterze wdrożeniowym. Autor przekonująco argumentuje, że technologia jest uniwersalna i może być skalowana. Warto byłoby jednak rozwinąć jej aspekt ekonomiczny (nakłady inwestycyjne i koszty eksploatacyjne) oraz odnieść się do kwestii bezpieczeństwa procesowego (praca z heksanem).

W rozdziale 8 *Podsumowanie pracy* Doktorant zawarł syntetyczną ocenę uzyskanych wyników badań. Potwierdzono możliwość efektywnego recyklingu kabli żelowych i odzysku żeluz hydrofobowego. Zastosowanie metod kriogenicznych i rozpuszczalnikowych okazało się skuteczne. Technologia wpisuje się w cele GOZ i może znaleźć zastosowanie przemysłowe. Podsumowanie jest zwarte, logiczne i dobrze łączy cele z wynikami. Stanowi dowód na weryfikację wszystkich hipotez, jednak mogłoby być nieco bardziej krytyczne (np. z punktu widzenia skalowania technologii istotne są potencjalne ograniczenia procesu skalowania, które Doktorant z pewnością zidentyfikował w trakcie szerokiego zakresu prowadzonych badań).

W rozdziale *Wnioski końcowe* Autor potwierdził możliwość odzysku surowców i żeluz na poziomie 90%, skuteczność metody heksanowej, brak istotnych emisji oraz zgodność proponowanej koncepcji technologicznej z zasadami gospodarki cyrkularnej. Wnioski są mocną stroną rozprawy — pokazują klarowny efekt badawczy i potencjał wdrożeniowy. Widać tu dojrzałość naukową i praktyczne podejście. Jedyne, czego mi tutaj zabrakło to chociażby krótkiego wskazania kierunków dalszych badań (np. optymalizacji energetycznej poszczególnych etapów procesu recyklingu).

Podsumowując powyższe, stwierdzam że sposób w jaki Doktorant sformułował tezy, cele i zakres pracy był poprawny metodycznie, właściwy i doprowadził w konsekwencji do zaplanowania eksperymentów i analiz, które zostały przeprowadzone i opisane w pracy. Zakres pracy zaplanowany dla realizacji postawionych celów uznaję za wystarczający.

3.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Sojki — „*Opracowanie technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych z wykorzystaniem termicznych i fizyko-chemicznych metod przeróbczych w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym*” należy uznać za trafny, aktualny i istotny zarówno naukowo, jak i praktycznie.

Problem przetwarzania kabli żelowych, stanowiących specyficzny odpad przemysłowy, jest wciąż niedostatecznie rozpoznany w literaturze krajowej i międzynarodowej. Obecne metody recyklingu kabli miedzianych są w większości nieefektywne wobec materiałów zawierających żele hydrofobowe, które utrudniają separację metalu, tworzyw i komponentów pomocniczych. Tym samym wybór tematu wpisuje się w aktualne potrzeby gospodarki surowcowej i polityki środowiskowej Unii Europejskiej, w szczególności w realizację celów zrównoważonego rozwoju (SDG 12) oraz zasad Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ).

Rozprawa łączy wymiar poznawczy (zbadanie właściwości i zachowania żelu w procesach fizykochemicznych) z wymiarem aplikacyjnym (opracowanie i weryfikacja technologii odzysku surowców). Takie podejście nadaje pracy charakter interdyscyplinarny, łączący elementy inżynierii środowiska, technologii materiałowej i chemii technicznej. Zastosowanie nowoczesnych metod, takich jak piroliza, kriogenika i ekstrakcja rozpuszczalnikowa, w odniesieniu do trudnego odpadu przemysłowego, świadczy o oryginalności koncepcji i dobrze uzasadnionym wyborze problemu badawczego.

Temat został także właściwie osadzony w kontekście krajowego przemysłu kablowego i regulacji środowiskowych, co potwierdza jego istotność gospodarczo-przemysłową. Opracowana technologia ma potencjał wdrożeniowy i może przyczynić się do zwiększenia stopnia odzysku surowców z kabli telekomunikacyjnych, co stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych metod recyklingu.

Podsumowując, należy stwierdzić, że wybór tematu jest w pełni uzasadniony naukowo i praktycznie, odpowiada aktualnym kierunkom badań w zakresie GOZ i stanowi wartość dodaną dla gospodarki surowcami wtórnymi oraz ochrony środowiska.

4. Analiza treści rozprawy wraz z uwagami krytycznymi

W poniższym rozdziale recenzji skupię uwagę na zagadnieniach naukowych samodzielnie rozwiązanych przez Doktoranta oraz dyskusji prawidłowości rozważań, uzyskanych wyników i wniosków oraz na uwagach i wątpliwościach, które nasunęły mi się przy pisaniu recenzji. Na końcu zamieszczonej analizy odniosę się do oryginalności i wskażę na główne walory rozprawy.

4.1 Zagadnienia naukowe i uytylitarne rozwiązane samodzielnie przez Doktoranta

Po przeprowadzeniu analizy treści rozprawy stwierdzam, że postawione przez Doktoranta cele naukowe i wdrożeniowe pracy zostały zrealizowane.

Autor rozprawy doktorskiej, Pan Dawid Sojka wykazał się samodzielnością badawczą oraz umiejętnością kompleksowego ujęcia problemu technologicznego w kontekście naukowym i praktycznym. Praca obejmuje zarówno opracowanie nowej koncepcji technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych, jak i jej eksperymentalne potwierdzenie w warunkach laboratoryjnych.

Do najważniejszych zagadnień naukowych rozwiązanych samodzielnie przez Doktoranta należy zaliczyć:

- analizę termiczną, fizykochemiczną i morfologiczną badanych materiałów w celu identyfikacji ich właściwości i potencjału odzysku,
- dobór i weryfikację skuteczności trzech metod separacji (z użyciem gorącej wody, gorącego powietrza oraz rozpuszczalnika organicznego),
- opracowanie i optymalizację Metody III z zastosowaniem heksanu jako rozpuszczalnika, prowadzącej do odzysku żelu hydrofobowego na poziomie przekraczającym 90%,

- ocenę wpływu parametrów procesowych (temperatury, czasu, rodzaju rozdrobnienia) na efektywność odzysku poszczególnych frakcji,
- wykonanie analizy cyklu życia (LCA) opracowanej technologii z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro, co pozwoliło na ilościową ocenę jej efektów środowiskowych i zgodności z zasadami Gospodarki o Obiegu Zamkniętym.

W aspekcie użytecznym Doktorant:

- zidentyfikował lukę technologiczną polegającą na braku podejścia do żelu hydrofobowego jako surowca a nie odpadu i w konsekwencji odpowiednio zaprojektował proces odzysku żelu,
- opracował metodykę badań separacji żelu hydrofobowego od komponentów metalicznych i z tworzyw sztucznych,
- opracował kompleksową koncepcję technologii (TRL 4) recyklingu kabli żelowych, możliwą do zastosowania także w odniesieniu do innych typów kabli telekomunikacyjnych. Opracowana technologia pozwala na odzysk miedzi o czystości 99,9%, odzysk żelu hydrofobowego o właściwościach użytkowych zgodnych z normami producentów oraz recykling tworzyw sztucznych, co łącznie daje bardzo wysoki poziom wykorzystania materiałów odpadowych i ograniczenie ilości odpadów wtórnych.
- złożył w UPRP wniosek patentowy pt. „*Urządzenie do odseparowania żelu hydrofobowego z kabli żelowych i sposób odseparowania żelu hydrofobowego z kabli żelowych*” (nr zgłoszenia: P. 452460).

Samodzielne zaprojektowanie i przeprowadzenie serii eksperymentów, a także interpretacja uzyskanych wyników w kontekście środowiskowym, świadczą o wysokim poziomie kompetencji badawczych Doktoranta. Zaproponowane rozwiązania mają charakter innowacyjny, praktyczny i wdrożeniowy, a ich efekty mogą zostać wykorzystane w przemyśle recyklingowym lub w dalszych badaniach nad technologiami odzysku surowców.

Podsumowując, można stwierdzić, że Doktorant samodzielnie rozwiązał istotny problem naukowo-techniczny, o dużym znaczeniu dla gospodarki cyrkularnej, i wykazał się zarówno zdolnością do pracy koncepcyjnej, jak i umiejętnością praktycznego zastosowania wyników badań.

4.2 Prawdliwość rozważań, uzyskanych wyników i wniosków oraz uwagi krytyczne

Treść rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze znajduje się w przedmiotowej problematyce. Nie stwierdzam w tym zakresie uchybień i oceniam Jego znajomość przedmiotu zagadnienia - w tym przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Rozważania przedstawione w rozprawie doktorskiej mgr inż. Dawida Sojki cechują się logicznością, poprawnością merytoryczną i spójnością z założonymi celami badawczymi oraz hipotezami. Autor w sposób systematyczny przeprowadza tok rozumowania — od analizy problemu odpadowych kabli żelowych i charakterystyki ich składu, poprzez badania wstępne nad właściwościami materiału, aż po opracowanie i weryfikację trzech metod separacji żelu hydrofobowego. Taka konstrukcja zapewnia przejrzystość narracji naukowej i umożliwia czytelne śledzenie procesu dochodzenia do wyników.

Wyniki uzyskane w toku badań są wiarygodne, dobrze udokumentowane i poparte odpowiednimi analizami eksperymentalnymi. Autor wykorzystał zarówno klasyczne metody analizy (DTA/TG, GC-MS, analiza fizykochemiczna), jak i nowoczesne narzędzia oceny środowiskowej (LCA w SimaPro). Dane liczbowo i graficznie przedstawiono w sposób przejrzysty, a wnioski z poszczególnych etapów są prawidłowo interpretowane i logicznie powiązane z rezultatami pomiarów. W szczególności pozytywnie należy ocenić porównanie efektywności trzech metod separacji, które pokazuje stopniowe dochodzenie do optymalnego rozwiązania (Metoda III – ekstrakcja heksanem).

Wnioski końcowe są syntetyczne, jednoznaczne i w pełni wynikają z przeprowadzonych badań. Potwierdzają prawidłowość hipotez oraz realizację celów pracy, wskazując, że opracowana technologia pozwala na odzysk żelu hydrofobowego z efektywnością powyżej 90%, przy jednoczesnym ograniczeniu negatywnego wpływu na środowisko. Zastosowanie analizy LCA w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym dodatkowo wzmacnia naukowy wymiar pracy i potwierdza jej wartość poznawczą.

Przyczynek do podjęcia pogłębionej dyskusji naukowej stanowi natomiast kilka zagadnień, które przedstawiam poniżej, z prośbą o odniesienie się do nich w trakcie obrony pracy:

Uwagi i pytania:

1. str. 15 – co było podstawą do przyjęcia minimalnego progu odzysku surowca na poziomie 90%, jako celu pracy?
2. str. 35 (m.in) – Autor w kilku miejscach pracy stosuje określenia „metoda”, „metodyka”, „metodologia” – niekiedy można odnieść wrażenie, że nieco zamiennie. Proszę najpierw wskazać różnice między tymi pojęciami a następnie każde z tych pojęć zastosować w odniesieniu do wybranych wątków pracy doktorskiej.
3. str. 61 – wykresy ilustrujące straty żeluz podczas cięcia badanych kabli (rys. 26-29) nie mają odniesienia w tekście rozprawy. Dodatkowo, informacje przedstawione na nich w formie wykresów słupkowych powtarzają treści zawarte w Tabelach 13-16. Docelowo, w publikacjach o charakterze naukowym prezentacja uzyskanych wyników w jednej formie (zestawienie tabelaryczne albo wykres) jest wystarczająca.
4. str. 62 – dlaczego do dalszych analiz przyjęto kable o długości 25 mm a nie te o długości 30 mm, dla których strata żeluz była najmniejsza?
5. str. 81 – w tabeli 72 wartość zużycia energii elektrycznej dla próbki nr 1 wynosi 0,00 kWh. Czy wynika ona z przyjęcia konwencji zapisu cyfry z dwoma miejscami po przecinku?
6. str. 106 – czy w tabeli 56 jednostką energii elektrycznej jest kWh?
7. str. 130 – tabela 74 – z czego wynikają tak znaczne różnice pomiędzy wartościami wskaźników „ekotoksyczność gleby” dla poszczególnych kabli (wartości 11,0; 2015; 720; 185)?
8. str. 134 – sformułowanie „metoda III polegająca na ekstrakcji rozpuszczalnikowej oraz odparowaniu rozpuszczalnika z mieszaniny z żeluz hydrofobowym, została uznana za technologię spełniającą wszystkie założenia w omawianej pracy” jest nieco niefortunne. Czym innym jest metoda a czym innym technologia.

Komentarze:

1. Część eksperymentalną pracy istotnie wzbogaciłoby omówienie niepewności pomiarowej i powtarzalności wyników, co zwiększyłoby wiarygodność danych liczbowych.
2. Analiza LCA, choć w bieżącej treści bardzo wartościowa, mogłaby zostać rozszerzona o scenariusze przemysłowe lub analizę ekonomiczną wdrożenia technologii w większej skali. Ważnym byłoby porównanie kosztu produkcji jednostki masy żeluz hydrofobowego w porównaniu do kosztu odzysku analogicznej jednostki.
3. Wartościowe z punktu widzenia przyszłej aplikacji byłoby choć krótkie nawiązania do kwestii bezpieczeństwa pracy z rozpuszczalnikami organicznymi (heksan).
4. W kilku miejscach część opisowa mogłaby zostać skrócona lub lepiej ustrukturyzowana, aby podkreślić najważniejsze różnice pomiędzy wariantowymi metodami odzysku.
5. Praca zawiera pewną ilość błędów stylistycznych i gramatycznych (co zaznaczyłem w treści), w celu ich efektywnego wyłapywania, w przyszłości sugeruję Autorowi drukować finalne wersje naukowych opracowań i ostatecznej korekty dokonywać na wersji papierowej (choć przyczynia się to niewątpliwie do wzrostu ilości odpadów i zmniejszenia zasobów leśnych).

Podkreślić należy, że wskazane powyżej uwagi i komentarze nie umniejszają wartości naukowej i oraz istotnych aspektów użytkowych pracy. Zaplanowany zakres pracy został zrealizowany a postawione cele zostały osiągnięte.

4.3 Oryginalność i główne walory rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Sojki charakteryzuje się dużym stopniem oryginalności naukowej oraz wyraźnym ukierunkowaniem aplikacyjnym. Autor podjął problem dotychczas niewystarczająco rozpoznany zarówno w literaturze krajowej, jak i światowej – zagospodarowanie odpadowych kabli żeluzowych, które ze względu na obecność hydrofobowych żeluz stanowią wyjątkowo trudny odpad do recyklingu ukierunkowanego na odzysk

wszystkich składowych kabli. Zagadnienie to, mimo rosnącego znaczenia w gospodarce surowcowej, nie posiadało do tej pory kompleksowego opracowania łączącego aspekty technologiczne, środowiskowe i ekonomiczne.

Oryginalność rozprawy przejawia się przede wszystkim w:

- opracowaniu autorskiej technologii separacji i odzysku surowców z kabli żelowych, obejmującej trzy alternatywne warianty procesu,
- zaproponowaniu i eksperymentalnym potwierdzeniu efektywności metody ekstrakcji heksanowej, pozwalającej na odzysk żelut hydrofobowego o czystości i właściwościach umożliwiających jego ponowne wykorzystanie,
- zastosowaniu analizy cyklu życia (LCA) do oceny wpływu opracowanej technologii na środowisko, co nadaje pracy interdyscyplinarny i nowoczesny charakter,
- identyfikacji potencjału wdrożeniowego opracowanej metody w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ).

Do głównych walorów rozprawy należy zaliczyć kompleksowość podejścia badawczego — od charakterystyki materiału odpadowego, przez badania procesowe, po ocenę środowiskową i ekonomiczną proponowanej technologii. Autor wykazał się zdolnością łączenia wiedzy z różnych dziedzin: inżynierii środowiska, technologii chemicznej, materiałoznawstwa i analiz LCA. Praca ma dzięki temu dużą wartość poznawczą, poszerzając wiedzę o zachowaniu żelut hydrofobowych i ich właściwościach w procesach fizykochemicznych. Na szczególnie podkreślenie zasługuje aspekt praktyczny wyników. Opracowana technologia pozwala na odzysk miedzi o czystości 99,9%, żelut hydrofobowego w ilości powyżej 90% oraz tworzyw sztucznych możliwych do ponownego wykorzystania. Taki poziom efektywności stawia opracowane rozwiązanie wśród najbardziej perspektywicznych metod recyklingu odpadowych kabli i dowodzi realnego potencjału wdrożeniowego.

Podsumowując, rozprawa jest oryginalnym osiągnięciem naukowym, o znaczących walorach zarówno poznawczych, jak i aplikacyjnych. Autor wykazał się twórczym podejściem, samodzielnością koncepcyjną oraz innowacyjnym łączeniem metod badawczych, co w pełni uzasadnia uznanie pracy za wartościowy wkład w rozwój nauki i praktyki inżynierskiej w obszarze technologii odzysku surowców. Zakres zrealizowanych prac stanowi Jego w pełni oryginalny dorobek a wyniki uzyskane w trakcie realizacji pracy dostarczają oprócz wartościowych wniosków naukowych także istotnych rekomendacji o charakterze praktycznym, przez co są one cenne z utilitarne-go punktu widzenia.

Uzyskany w trakcie realizacji pracy materiał jest bardzo interesujący i z pewnością wart dalszej popularyzacji poprzez np. prezentowanie uzyskanych wyników jako publikacji w czasopismach naukowych a także poprzez referaty wygłaszane na konferencjach z obszaru recyklingu bądź inżynierii środowiska (w tym GOZ-u).

5. Wnioski końcowe

Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej uwagi i spostrzeżenia stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Dawida Sojkę rozprawa pt. *„Opracowanie technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych z wykorzystaniem termicznych i fizykochemicznych metod przeróbczych w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym”* spełnia w całości określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej inżynierii środowiska, górnictwo i energetyka; dowodzi także Jego umiejętności samodzielnego zaplanowania i przeprowadzenia szerokiego zakresu badań eksperymentalnych.

Praca posiada bardzo wartościowe aspekty użytkowe, warsztat naukowy Doktoranta może być z powodzeniem rozwijany np. w kierunku recyklingu innych materiałów o podobnym charakterze a opracowane modele analizy LCA stosowane także w innych scenariuszach recyklingu materiałowego.

Wobec powyższych faktów wnioskuję do Wysockiej Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Dawida Sojki do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Podpisał Jarosław Zuwała