

Wydział Energetyki i Paliw

dr hab. inż. Karol Sztekler, prof. AGH
tel.: +48 12 617 50 25
e-mail: sztekler@agh.edu.pl

Kraków, 7.11.2025r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida Sojki pod tytułem
„Opracowanie technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych z
wykorzystaniem termicznych
i fizyko-chemicznych metod przeróbczych w kontekście
Gospodarki o Obiegu Zamkniętym”

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie Uchwały Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z 25.09.2025 nr. 209/2025. Rozprawa doktorska została napisana pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Krzysztofa Pikonia oraz dr inż. Katarzyny Klejnowskiej. Praca doktorska została złożona w dyscyplinie Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka. Rozprawa stanowi podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych dla mgr inż. Dawida Sojki.

Rozprawa doktorska poświęcona jest opracowaniu nowatorskiej metody odzysku surowców z kabli żelowych, które dotychczas stanowiły trudny do przetworzenia odpad, jest jak najbardziej zasadna z punktu widzenia aktualnych wyzwań cywilizacyjnych, politycznych i technologicznych.

Praca dotyczy istotnej problematyki związanej z recyklingiem kabli wypełnionych żelom hydrofobowym, gdzie obecnie stosowane technologie przetwarzania tego typu odpadów nie spełniają wytycznych gospodarki obiegu zamkniętego. Kable żelowe stanowią rosnący strumień odpadów pochodzących między innymi z sektora telekomunikacyjnego i energetycznego, a obecne metody ich przetwarzania są kosztowne i obciążające dla środowiska. Opracowanie efektywnej i bezodpadowej technologii odzysku surowców z kabli żelowych ma kluczowe znaczenie zarówno dla ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko, jak i dla racjonalnego gospodarowania surowcami. Wpisuje się to bezpośrednio w priorytety polityki Unii Europejskiej dotyczące transformacji w kierunku gospodarki obiegu zamkniętego, zwiększenia poziomu recyklingu materiałów oraz zmniejszenia ilości odpadów trafiających na składowiska. Podjęcie tej tematyki

stanowi zatem istotny krok w kierunku rozwoju nowoczesnych, zrównoważonych rozwiązań technologicznych w obszarze recyklingu odpadowych kabli żelowych.

W zakres niniejszej rozprawy doktorskiej wchodzi opracowanie i przebadanie metod odzysku surowców z odpadowych kabli wypełnionych żelom hydrofobowym. W ramach pracy przeprowadzono badania laboratoryjne trzech metod odzysku surowca z kabli żelowych: separacji żelom gorącą wodą, gorącym powietrzem oraz ekstrakcją heksanem z destylacją próżniową. Na podstawie wyników analiz określono najbardziej efektywne rozwiązanie, pozwalające na odzysk miedzi o czystości 99,9% oraz żelom hydrofobowego w ilości przekraczającej 90% udziału masowego żelom w budowie kabla. Dla opracowanej technologii wykonano analizę cyklu życia (LCA), potwierdzającą jej zgodność z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego.

Tematyka pracy doktorskiej jest ważna zarówno z punktu widzenia badawczego, jak i wdrożeniowego, zwłaszcza w kontekście opracowania własnej, dedykowanej technologii odzysku surowców z kabli wypełnionych żelom hydrofobowym.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska składa się z 9 rozdziałów i liczy 184 stron łącznie ze streszczeniami, spisem rysunków i tabel, celem i zakresem pracy, ogólną koncepcją badań i planem pracy, wnioskami i wykazem literatury oraz załącznikami. Literatura liczy 86 pozycji. W wykazie literatury Autor zamieścił między innymi pozycje książkowe, artykuły naukowe, patenty, akty prawne oraz źródła internetowe. Rozprawa została starannie zaplanowana i logicznie uporządkowana, a kolejne rozdziały prowadzą czytelnika przez złożony i interdyscyplinarny obszar badawczy związany z opracowaniem nowatorskiej metody odzysku surowców z kabli żelowych.

Pierwszy rozdział stanowi obszerny przegląd literatury, który wprowadza w zagadnienia będące przedmiotem badań. Przedstawiono w nim kontekst zrównoważonego rozwoju oraz ideę gospodarki obiegu zamkniętego w odniesieniu do tematyki pracy. Dokonano analizy krajowego rynku produkcji kabli żelowych, Autor omawia aktualne trendy związane z ich zagospodarowaniem po zakończeniu eksploatacji. W rozdziale uwzględniono również stan techniki w zakresie metod recyklingu kabli żelowych.

Rozdział drugi poświęcony został charakterystyce materiałów badawczych oraz analizie morfologii kabli wypełnionych żelom hydrofobowym. W rozdziale przedstawiono szczegółowy opis badań przeprowadzonych na czterech typach kabli telekomunikacyjnych, obejmujących określenie ich budowy, składu materiałowego oraz udziału poszczególnych komponentów. W ramach prac badawczych wykonano analizę morfologiczną każdego z wybranych kabli, gdzie sporządzono dokumentację fotograficzną oraz określono udział masowy poszczególnych materiałów w kablu żelowym.

W rozdziale trzecim przedstawiono wyniki badań wstępnych dotyczących analizy właściwości fizycznych i termicznych kabli telekomunikacyjnych wypełnionych żelom hydrofobowym oraz identyfikacji potencjalnych kierunków ich przetwarzania. Autor skoncentrował się na określeniu parametrów niezbędnych do opracowania skutecznych technologii odzysku surowców z odpadów kabli żelowych. Przeprowadzone badania obejmowały zarówno analizy termiczne i morfologiczne, jak i eksperymenty mające na celu ocenę wpływu różnych metod rozdrabniania oraz termicznego przetwarzania na skład i właściwości badanego materiału. W ramach pracy wykonano różnicową analizę termiczną (DTA) oraz analizę termogravimetryczną (TG), które umożliwiły określenie temperatur przemian fazowych, stabilności termicznej oraz charakterystycznych właściwości cieplnych poszczególnych komponentów kabla. Analizie poddano zarówno cały kabel, jak i jego poszczególne komponenty polimerowe. W rozdziale opisano badania stopnia granulacji próbek, mające na celu określenie wpływu sposobu podziału kabli na zachowanie żelom hydrofobowego oraz jego straty.

Przeanalizowano próbki o różnej długości, a następnie oceniono straty żeluz powstałe podczas rozdrabniania z wykorzystaniem szlifierki kątowej. Wyniki porównano z danymi uzyskanymi w badaniach morfologicznych. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki prób kriogenicznego rozdrabniania oraz prasowania odpadowych kabli żelowych, których celem było zbadanie możliwości oddzielenia żeluz od metalu i tworzyw sztucznych. Autor określił optymalny czas zanurzenia próbek w ciekłym azocie, analizując stopień krystalizacji żeluz oraz efektywność jego separacji od pozostałych komponentów kabla. W ramach rozdziału trzeciego wykonano badania dotyczące termicznego przetwarzania kabli żelowych w procesie pirolizy, którego celem było zbadanie produktów powstających w procesie pirolizy organicznych frakcji kabli żelowych. W rozdziale przedstawiono opis stanowiska badawczego, schemat pieca pirolitycznego oraz parametry prowadzenia procesu.

W kolejnym, czwartym rozdziale Autor przedstawia szczegółowy opis badań dotyczących możliwości odzysku surowców z kabli wypełnionych żeluz hydrofobowym. Celem przeprowadzonych prac było opracowanie i weryfikacja wielowariantowych metod separacji żeluz od pozostałych komponentów kabla, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości fizykochemicznych odzyskanych materiałów. Na potrzeby badań zaprojektowano i wykonano stanowiska laboratoryjne, które odwzorowywały schemat linii technologicznej do przerobu kabli miedzianych gdzie wprowadzono dwie metody umożliwiające przetwarzanie kabli żelowych. W pierwszej z nich, wykorzystano gorącą wodę jako rozpuszczalnik żeluz hydrofobowego i zbadano możliwość usuwania żeluz z powierzchni przewodów. W drugiej metodzie zastosowano podwyższoną temperaturę powietrza, uzyskaną za pomocą suszarki laboratoryjnej oraz opalarki wysokotemperaturowej, której zadaniem było upłynnienie żeluz i jego oddzielenie od pozostałych składników kabla. W toku badań zmodyfikowano metodę II, wprowadzając zmiany w kolejności operacji technologicznych, co pozwoliło zwiększyć efektywność separacji. Zbadano również wpływ stopnia rozdrobnienia oraz temperatury na skuteczność odzysku żeluz. W dalszej części rozdziału Autor przedstawił wyniki analiz termicznych DTA/TG dla trzech frakcji uzyskanych po procesie separacji: petrożeluz, frakcji polimerowej oraz frakcji metalicznej. Zbadano stabilność cieplną odzyskanych materiałów, wykazując brak istotnych zmian w ich właściwościach w stosunku do materiałów pierwotnych.

W rozdziale piątym Autor przedstawił wyniki badań dotyczących poprawy efektywności opracowywanych technologii odzysku surowców z odpadowych kabli wypełnionych żeluz hydrofobowym. Celem prac opisanych w tym rozdziale było zwiększenie skuteczności separacji żeluz hydrofobowego od pozostałych składników, w szczególności od metalu i tworzyw sztucznych, oraz opracowanie technologii umożliwiającej jego ponowne wykorzystanie. W rozdziale tym Autor kontynuuje badania opisane wcześniej, wykorzystując i modyfikując opracowane wcześniej metody separacji. Do dalszych eksperymentów zastosowano trzy warianty technologiczne: Metodę I - użycie gorącej wody, Metodę II - użycie gorącego powietrza oraz Metodę III - zastosowanie heksanu jako rozpuszczalnika żeluz. Metody pierwsza i druga zostały udoskonalone na podstawie wyników z rozdziału czwartego, natomiast metoda trzecia opracowana została w oparciu o analizę stanu techniki dotyczącego recyklingu kabli żelowych. Analizie poddano skuteczność poszczególnych metod w zakresie odseparowania żeluz od kabli miedzianych, a także wpływ parametrów procesowych takich jak temperatura, czas działania czynnika i stopień rozdrobnienia materiału – na końcową efektywność odzysku. W Metodzie I, opartej na oddziaływaniu gorącej wody, Autor przeprowadził badania symulujące proces przemysłowy. Analizie chemicznej poddano również powstające w trakcie procesu roztwory, oceniając ich parametry fizykochemiczne w kontekście obowiązujących norm środowiskowych. Autor stwierdza że metoda ta jest nieefektywna ze względu na niski poziom separacji żeluz oraz generowanie ścieków wymagających dalszego oczyszczania. W Metodzie II wykorzystano oddziaływanie gorącego powietrza o temperaturze odpowiadającej temperaturze przemiany fazowej żeluz hydrofobowego. Zbadano wpływ temperatury i czasu procesu na skuteczność separacji. Pomimo uzyskania częściowej separacji Autor stwierdza że metoda ta również została uznana za mało efektywną, jednak Autor wskazał jej potencjalne zastosowanie w kontekście integracji z klasycznymi liniami do recyklingu kabli miedzianych. W trakcie badań metody I i II prowadzono

także analizę gazów procesowych i emisję zanieczyszczeń, co pozwoliło na ocenę ich wpływu środowiskowego. Autor wskazał, że najbardziej efektywna jest metoda III, w której zastosowano heksan jako rozpuszczalnik żelu. Zbadano chemiczne właściwości rozpuszczalnika, jego zdolność do rozpuszczania żelu oraz możliwość ponownego wykorzystania w obiegu zamkniętym. Odzyskany żel hydrofobowy poddano badaniom a uzyskane wyniki potwierdziły, że żel spełnia wymagania normowe w zakresie wymogów dielektrycznych. Autor w celu określenia czystości heksanu pozostałego po procesie separacji przeprowadził badania chromatograficzne. Analiza porównawcza z próbką heksanu o wysokiej czystości potwierdziła możliwość ponownego wykorzystania odzyskanego rozpuszczalnika, co dowodzi zgodności opracowanej technologii z założeniami gospodarki obiegu zamkniętego.

W rozdziale szóstym Autor przedstawił wyniki oceny cyklu życia (LCA) opracowanej technologii odseparowania żelu hydrofobowego od pozostałych surowców z odpadowych kabli żelowych. Celem przeprowadzonej analizy była ocena wpływu środowiskowego zaproponowanej technologii w porównaniu z produkcją nowego żelu. Analizę LCA wykonano osobno dla wszystkich badanych materiałów dla trzeciej metody odzysku surowców z kabli żelowych oraz dla produkcji nowego żelu, która stanowiła punkt odniesienia. Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania a dla każdego z wyników wyznaczono poziom niepewności z wykorzystaniem analizy Monte Carlo. Przeprowadzona ocena cyklu życia potwierdziła zasadność wdrożenia metody III w kontekście zrównoważonego rozwoju oraz gospodarki obiegu zamkniętego, wykazując, że odzysk żelu hydrofobowego z odpadów kablowych generuje znacznie mniejsze obciążenie środowiska niż produkcja nowego materiału.

W rozdziale siódmym Autor przedstawił opis opracowanej technologii odzysku surowców z kabli żelowych, stanowiącej wynik końcowy przeprowadzonych badań. Opracowana metoda, oparta na ekstrakcji rozpuszczalnikowej (Metoda III), polega na rozdzieleniu żelu hydrofobowego poprzez zastosowanie rozpuszczalnika organicznego, a następnie jego odparowanie w kontrolowanych warunkach. Autor stwierdza, że opracowana technologia stanowi znaczący postęp w zakresie przetwarzania zużytych kabli, przewyższając efektywnością oraz mniejszym wpływem na środowisko w porównaniu do dotychczas stosowanych rozwiązań. W rozdziale stwierdzono, że proponowana przez Autora technologia może zostać zintegrowana z istniejącymi liniami do recyklingu różnych typów kabli miedzianych, bez pogorszenia jakości końcowych produktów.

W rozdziale ósmym Autor dokonał podsumowania przeprowadzonych badań oraz przedstawił najważniejsze wnioski wynikające z opracowania technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych. Rozdział stanowi zestawienie wyników uzyskanych w poszczególnych etapach pracy oraz ocenę ich znaczenia dla rozwoju technologii recyklingu materiałów kablowych.

Rozdział dziewiąty stanowi podsumowanie całości pracy badawczej, w którym Autor przedstawił zestawienie wyników oraz wnioski potwierdzające słuszność założeń i hipotez badawczych. Rozdział ten podkreśla znaczenie opracowanej technologii w kontekście możliwości efektywnego odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych oraz jej potencjał wdrożeniowy w skali przemysłowej. Autor podkreśla, że opracowana technologia wpisuje się w założenia gospodarki obiegu zamkniętego, łącząc wysoką skuteczność separacji z minimalnym wpływem na środowisko.

Ogólna ocena rozprawy

Wartość merytoryczna pracy

Rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom merytoryczny, zarówno pod względem naukowym, jak i inżynierskim. Autor w sposób kompleksowy i rzetelny przeanalizował cały proces technologiczny odzysku surowców z kabli żelowych. Istotnym osiągnięciem naukowym jest opracowanie technologii pozwalającej na odzysk żelut hydrofobowego w ilości przekraczającej 90% jego masowego udziału w strukturze kabla. Praca charakteryzuje się kompleksowym podejściem badawczym, obejmującym zarówno analizę morfologiczną i badania fizykochemiczne, jak i procesy kriogenicznego rozdrabniania, pirolizy oraz ekstrakcji rozpuszczalnikowej. Zastosowanie analizy oceny cyklu życia (LCA) z wykorzystaniem oprogramowania SimaPro dodatkowo podnosi walor naukowy i aplikacyjny rozprawy, pozwalając na ocenę środowiskową opracowanej technologii. Wyniki pracy mają znaczenie nie tylko poznawcze, ale również praktyczne, umożliwiając zastosowanie opracowanej technologii w zakładach zajmujących się recyklingiem kabli.

Oryginalność i nowatorstwo

Rozprawa wnosi istotny i oryginalny wkład w rozwój technologii recyklingu odpadów kablowych, w szczególności kabli żelowych, które dotychczas stanowiły trudny do przetworzenia odpad. W pracy przedstawiono różne metody odzysku żelut, miedzi oraz tworzyw sztucznych z kabli żelowych, które były analizowane w pracy doktorskiej. Innowacyjność pracy przejawia się w opracowaniu i walidacji trzeciej metody separacji żelut hydrofobowego, opartej na ekstrakcji heksanem i destylacji próżniowej, umożliwiającej odzysk żelut powyżej 90%, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej czystości odzyskanej miedzi 99,9% oraz tworzyw sztucznych. Opracowana technologia wyróżnia się wysokim potencjałem wdrożeniowym oraz zgodnością z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego, dzięki możliwości ponownego wykorzystania żelut hydrofobowego i rozpuszczalnika heksanu, co wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju. Na podkreślenie zasługuje również praktyczny wymiar opracowanego rozwiązania, które zostało zaprojektowane z myślą o integracji z istniejącymi liniami technologicznymi do recyklingu kabli miedzianych. Takie podejście zwiększa potencjał wdrożeniowy technologii i otwiera możliwość jej komercjalizacji w sektorze przemysłowym. O nowatorskim charakterze rozprawy świadczy również zgłoszenie patentowe (P.452460), będące wynikiem badań nad metodami odzysku materiałów z kabli żelowych. Dotyczy ono urządzenia do odseparowania żelut hydrofobowego z kabli żelowych oraz sposobu jego odseparowania, co potwierdza wysoki poziom innowacyjności i gotowość opracowanej technologii do wdrożenia przemysłowego.

Poziom warsztatowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wynikiem wieloetapowych badań eksperymentalnych oraz analitycznych, wykonanych z zachowaniem wysokich standardów naukowych, właściwej dyscypliny badawczej i staranności metodologicznej. Autor wykazał się bardzo dobrym przygotowaniem warsztatowym, zarówno w zakresie prowadzenia badań fizykochemicznych, jak i opracowania oraz interpretacji wyników. Dużą zaletą pracy jest umiejętne wykorzystanie zróżnicowanych metod badawczych i analitycznych, połączone z krytyczną analizą uzyskanych rezultatów. Autor wykazał się dojrzałością naukową, potrafiąc właściwie identyfikować problemy technologiczne i proponować konkretne rozwiązania inżynierskie.

Uwagi redakcyjne do pracy oraz uwagi dyskusyjne.

Podczas analizy przedstawionej rozprawy doktorskiej zwróciłem uwagę na pewne aspekty, które wymagają uwagi krytycznej. Należy jednak podkreślić, że te uwagi nie umniejszają wartości naukowej pracy, lecz są raczej refleksją nad możliwościami dalszego wzbogacenia dyskursu naukowego. Szczegółowe punkty krytyczne zostaną omówione poniżej.

Uwagi redakcyjne:

1. W pracy doktorskiej nie zamieszczono wykazu symboli i skrótów, którego zamieszczenie znacząco ułatwiłoby odbiór treści oraz poprawiłoby przejrzystość i czytelność rozprawy, zwłaszcza w kontekście stosowanej terminologii oraz oznaczeń matematycznych i technicznych.
2. W „Spisie rysunków” brakuje umieszczenia rysunku Rys. 11. Rysunek ten występuje w treści pracy, jednak nie został ujęty w spisie. Występuje także zduplikowane oznaczenie rysunku nr 66: Rys. 66. Schemat opracowanej technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych i Rys. 66. Zakres temperatur próba C1. W treści pracy drugi z wymienionych rysunków został prawidłowo oznaczony jako Rys. 67. Zakres temperatur próba C1. Zduplikowanie numeracji Rys. 66 spowodowało, że w spisie rysunków numeracja kończy się na Rys. 92, podczas gdy w pracy właściwej występuje Rys. 93.
3. W części pracy zatytułowanej „Ogólna koncepcja badań” (str. 18) zaprezentowano grafikę przedstawiającą plan pracy, jednak w tekście brak jest jej numeracji oraz odwołania do rysunku w tekście.
4. W kilku miejscach pracy występują niedoskonałości interpunkcyjne oraz edycyjne (np. str. 20, 23, 75, 91, 131).
5. Oznaczenia literaturowe w rozdziale „1. Wprowadzenie” są niejednolite, przy niektórych rysunkach i tabelach pojawiają się odwołania bibliograficzne, przy innych brak ich całkowicie lub są one niejednoznaczne. Odnosi się to do części rysunków Rys. 1, 2, 3, 5, 6 i tabel Tab. 1–4.
6. Na stronie 92 znajduje się wyłącznie opis do Rys. 50, przy czym cała strona pozostaje pusta.
7. Rysunki i tabele w pracy przedstawione są czytelnie i przejrzysto. Natomiast Rys. 64. budzi pewne zastrzeżenia, czytelność prezentowanych wyników jest ograniczona, zwłaszcza w odniesieniu do takich kategorii jak np.: ekotoksyczność morska, ekotoksyczność wody słodkiej, użytkowanie gruntów, których wartości są słabo widoczne i trudne do interpretacji. Utrudnia to pełną ocenę i porównanie przedstawionych danych.
8. W bibliografii pracy znajduje się pozycja 32, którą trudno uznać za typowy materiał literaturowy w rozumieniu naukowym, nie stanowi ona źródła literaturowego, gdyż ma charakter informacji ustnej (niepublikowanej), nieweryfikowalnej i pozbawionej odniesienia do źródeł naukowych lub recenzowanych publikacji. Tego rodzaju dane mogą mieć wartość pomocniczą lub ilustracyjną, jednak nie powinny być traktowane jako element materiału literaturowego.

Uwagi dyskusyjne:

1. W pracy brakuje stabelaryzowanego wykazu urządzeń pomiarowych z podaniem ich zakresów pomiarowych i dokładności pomiarowej oraz analizy błędów pomiarowych.
2. W części rozprawy doktorskiej „Ogólna koncepcja badań i plan pracy” wskazano, że wykonano LCA dla każdej metody odzysku, natomiast w rozdziale 6 przedstawiono analizę jedynie dla jednej metody. Warto doprecyzować, czy analizy wykonano dla wszystkich metod, a w pracy zaprezentowano tylko wybrane wyniki.
3. Autor w rozdziale 1.5 „Analiza stanu techniki związana z recyklingiem kabli żelowych” przedstawił zestawienie patentów dotyczących metod odzysku surowców z kabli żelowych,

jednak nie wskazał, jaki element innowacyjny proponowanego rozwiązania przez Autora odróżnia go od opisanych w literaturze i dokumentach patentowych technologii. Warto byłoby również omówić ograniczenia w zastosowaniu istniejących technologii oraz wskazać, czy są one wdrożone w skali przemysłowej. Ponadto, Autor zaprezentował jedynie jedno rozwiązanie technologiczne Rys. 6., gdzie nie wskazano informacji dotyczących efektywności odzysku żeluz hydrofobowego przy zastosowaniu tej technologii, a także analizy jej ograniczeń.

4. W pracy doprecyzowania wymaga kwestia wymagań technologicznych związanych z budową kabli, w tym informacji, o normach lub wytycznych dotyczące udziału żeluz hydrofobowego w ich strukturze. Uzupełnienie tych danych pozwoliłoby pełniej zrozumieć aspekty konstrukcyjne i technologiczne mające wpływ na proces recyklingu kabli żelowych.
5. W przypadku kriogenicznego rozdrabniania kabli żelowych wymaga doprecyzowania kwestia zużycia ciekłego azotu, w przeliczeniu na jednostkę masy kabla. Informacja ta pozwoliłaby ocenić efektywność i energochłonność procesu w ujęciu technologicznym i ekonomicznym.
6. W rozdziale 4 Autor przedstawił trzy stopnie rozdrabniania próbek kabli >24 mm, <24 mm oraz <12 mm. Wskazane jest podanie uzasadnienia przyjętych kryteriów podziału. Autor wskazał, że linia do rozdzielania kabli została przygotowana na podstawie istniejących rozwiązań, jednak kwestia wpływu przyjętych założeń na określenie granicznych wielkości próbek wymagałaby doprecyzowania. Ponadto, w podsumowaniu Autor stwierdził, że „wyniki badań określenia stopnia granulacji wykazały, iż najkorzystniejszą wielkością próbek jest długość 25 mm”. Warto doprecyzować, na jakiej podstawie oraz według jakiego kryterium dokonano wyboru tej długości jako optymalnej. Czy wynikała ona z efektywności rozdziału materiałów, minimalizacji strat żeluz hydrofobowego, jakości odzyskanych frakcji, czy też z przesłanek technologicznych lub ekonomicznych?
7. W rozdziale 3.4 Autor przedstawił wyniki termicznego przetwarzania kabli żelowych w piecu pirolitycznym. Jakie kryterium przyjęto przy wyborze temperatury prowadzenia pirolizy? Czy wynikało to z wcześniejszych badań wstępnych, analizy literaturowej, charakterystyki materiału lub ograniczeń technologicznych?
8. W części przeglądowej brakuje informacji dotyczących potencjalnych, innowacyjnych możliwości zagospodarowania żeluz hydrofobowych pochodzących z kabli żelowych. Warto wskazać możliwe kierunki wykorzystania odzyskanego żeluz z kabli żelowych.
9. W przypadku metody III Autor zastosował jako rozpuszczalnik heksan. Jakie inne rodzaje rozpuszczalników mogłyby być wykorzystane do prowadzenia procesu odzysku żeluz z kabli żelowych, oraz jakie kryteria zostały uwzględnione przy wyborze heksanu do realizacji tego etapu badań?
10. W rozdziale 6 Autor przeprowadził ocenę cyklu życia (LCA) dla metody III, analizując oddzielnie wszystkie badane materiały oraz proces produkcji nowego żeluz jako wartość odniesienia. Nie wskazano jednak, jakie dane wejściowe zostały wprowadzone do oprogramowania w celu wykonania obliczeń LCA.
11. W pracy wskazano, że kontynuacja działań wdrożeniowych dla metody III wymaga zwiększenia skali instalacji z poziomu laboratoryjnego (TRL 4) do przemysłowego (TRL 9), przy czym głównym wyzwaniem ma być utrzymanie odzysku żeluz hydrofobowego na poziomie powyżej 90%. Jakie działania lub modyfikacje technologiczne należy wprowadzić w celu zachowania tak wysokiej efektywności procesu przy przejściu do dużej skali przemysłowej? Jak zmiane ulegną nakłady energetyczne oraz inwestycyjne w przypadku zwiększenia skali instalacji?

Wniosek końcowy

Mgr inż. Dawid Sojka jest Autorem rozprawy doktorskiej pt. *„Opracowanie technologii odzysku surowców z odpadowych kabli żelowych z wykorzystaniem termicznych i fizyko-chemicznych metod przeróbczych w kontekście Gospodarki o Obiegu Zamkniętym”*, która wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, stanowiąc oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowo-technicznego dotyczącego przetwarzania trudnych odpadów przemysłowych.

Rozprawa charakteryzuje się wysokim poziomem innowacyjności technologicznej, wynikającym z opracowania nowatorskiej metody odzysku surowców z kabli żelowych, które dotychczas stanowiły trudny do zagospodarowania odpad.

Szczególną wartość naukową stanowi opracowanie i walidacja trzeciej metody separacji żeluz hydrofobowego (Metoda III), opartej na ekstrakcji heksanem i destylacji próżniowej. Opracowany proces umożliwia odzysk żeluz hydrofobowego powyżej 90% jego udziału masowego w strukturze kabla, co wykracza poza możliwości obecnie stosowanych metod recyklingu.

Na szczególne podkreślenie zasługuje zgodność opracowanej technologii z założeniami gospodarki obiegu zamkniętego. Technologia ta minimalizuje ilość generowanych odpadów wtórnych, a jednocześnie umożliwia ponowne wykorzystanie odzyskanych materiałów w tym żeluz hydrofobowego oraz rozpuszczalnika (heksanu) co w pełni wpisuje się w cele zrównoważonego rozwoju. Praca ma również wysoki walor praktyczny, gdyż została zrealizowana we współpracy z przemysłem, co zwiększa jej potencjał wdrożeniowy. Autor wykazał się dużą świadomością technologiczną, trafnie identyfikując problemy operacyjne i proponując konkretne rozwiązania. Ważnym elementem pracy jest przeprowadzenie pełnej analizy cyklu życia (LCA) opracowanej technologii, która wykazała, że odzysk żeluz z kabli żelowych jest znacznie mniej obciążający dla środowiska niż produkcja nowego żeluz – zarówno pod względem emisji gazów cieplarnianych, zużycia surowców kopalnych, jak i toksyczności środowiskowej. O wysokim poziomie innowacyjności rozprawy świadczy również zgłoszenie patentowe P.452460 dotyczące stanowiska badawczego dla metody II (gorące powietrze), co potwierdza gotowość technologii do komercjalizacji. Opracowana technologia dla metody III została zaprojektowana z myślą o integracji z istniejącymi liniami technologicznymi do recyklingu kabli miedzianych, co pozwala na przetwarzanie kabli żelowych bez konieczności ich wcześniejszego sortowania, co istotnie upraszcza proces i obniża koszty operacyjne. Autor wykazał, że opracowana technologia może zostać wdrożona zarówno w zakładach zajmujących się recyklingiem kabli, jak i w instalacjach wykorzystujących ekstrakcję rozpuszczalnikową, co czyni ją rozwiązaniem uniwersalnym i praktycznie zastosowalnym w przemyśle.

Mając na uwadze powyższe, stwierdzam, że Autor wykazał się rozległą wiedzą techniczną i umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych w zakresie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Wszystkie cele pracy zostały osiągnięte, a postawione tezy potwierdzone. Pod względem merytorycznym rozprawa stoi na wysokim poziomie naukowym, a ewentualne uwagi redakcyjne nie wpływają na jej ogólną wartość i znaczenie.

Biorąc pod uwagę ww. ocenę rozprawy stwierdzam, iż praca doktorska Pana mgr inż. Dawida Sojki spełnia wymagania stawiane w art. 190 Ustawie z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, dlatego stawiam wniosek do Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Karol Sztekler, prof. AGH