

Zabrze, 21 października 2025

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa Pana mgr inż. Hamzy MUMTAZA
pt. „*Experimental analysis of the waste hydrothermal treatment process*”

Promotor rozprawy:

prof. dr hab. inż. Sebastian Werle (Pol. Śląska)

Promotor pomocniczy:

dr inż. Szymon Sobek (Pol. Śląska)

1. Wprowadzenie

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 25.09.2025r. w/s wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej. Recenzja przygotowana jest w oparciu o Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2024 r., poz. 1571 z późn. zm.) na podstawie rozprawy doktorskiej stanowiącej opracowanie zwarte.

2. Ogólna ocena rozprawy

2.1 Zakres rozprawy

Przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską stanowi cykl siedmiu powiązanych tematycznie artykułów, opublikowanych w czasopismach naukowych, co zgodne jest z Art. 187 ust. 3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2024 r., poz. 1571 z późn. zm.), który stanowi, iż: „**Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna, w tym monografia naukowa, zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej**”.

W bieżącym przypadku, przedmiotowe publikacje, które szerzej opisane zostały w rozdziałach 1-7 pracy poświęcone są problematyce oksydacyjnego upłynniania wybranych odpadowych materiałów polimerowych i kompozytowych oraz właściwościom i kierunkom zastosowania stałych i ciekłych produktów tego procesu. Tytuł rozprawy doktorskiej odpowiada

zakresowi merytorycznemu publikacji, a jej całość dotyczy zagadnień mieszczących się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Przedstawioną pracę można podzielić na trzy zasadnicze części. Pierwsza z nich ma charakter wprowadzający. Składa się ze streszczeń w języku polskim i angielskim oraz dwóch nienumerowanych rozdziałów: rozdziału charakteryzującego organizację samej rozprawy (*Układ rozprawy*) oraz rozdziału określającego szczegółowy wkład merytoryczny Doktoranta w każdą z publikacji. Druga z nich, na którą składają się numerowane rozdziały od 1-8 oraz nienumerowane rozdziały: *Podsumowanie i wnioski* oraz *Literatura* to obejmujący 80 stron „autoreferat” – trzon pracy, w którym Doktorant opisuje cały własny proces badawczy, w układzie chronologicznym z podziałem na kolejne publikacje. W tej części (rozdział 1 – *Wprowadzenie ogólne*), Doktorant wyszczególnia luki badawcze, które zidentyfikował w trakcie analizy stanu wiedzy oraz wskazuje cel główny oraz cele cząstkowe pracy. Wybrane do badań materiały oraz metody badawcze są opisane w rozdziale 2 – *Materiały i metody*. Rozdziały 2-8 obejmują uzyskane w trakcie pracy Doktoranta wyniki (z podziałem na poszczególne publikacje stanowiące kolejne części cyklu) – kolejne rozdziały odpowiadają kolejnym publikacjom z cyklu. Zbiorcze podsumowanie oraz interpretację uzyskanych wyników ujmuje rozdział *Podsumowanie rozprawy, wnioski ogólne i perspektywy dalszych badań*. Pracę uzupełnia spis rysunków, tabel, stosowanych symboli i oznaczeń a także bibliografia. Drugą część pracy stanowią wydruki wszystkich publikacji naukowych składających się na przedmiotowy cykl.

W rozdziale 1 pt. *Wprowadzenie ogólne* Autor przedstawia globalny i europejski kontekst problemu gospodarowania odpadami polimerowymi oraz odpadami z sektora energetyki odnawialnej. Autor rozpoczyna od diagnozy skali zjawiska: światowa produkcja odpadów ma przekroczyć 3,4 mld ton rocznie do 2050 r., z czego znaczny udział stanowią odpady komunalne (MSW), tworzywa sztuczne i kompozyty. Wskazano też na dynamiczny rozwój sektora odnawialnych źródeł energii – moc zainstalowana w turbinach wiatrowych przekroczyła 900 GW, a w fotowoltaice 1,2 TW, co rodzi nowe wyzwania związane z zagospodarowaniem zużytych łopat turbin (WTBs) i paneli PV. W rozdziale omówiono także unijną politykę środowiskową: Dyrektywę Ramową o Odpadach (2008/98/EC), Dyrektywę Składowiskową (1999/31/EC), Europejski Zielony Ład oraz Plan Działań dla Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (CEAP 2.0). Autor wskazuje, że przejście od gospodarki linearnej do cyrkularnej wymaga innowacyjnych technologii odzysku surowców i energii, szczególnie dla materiałów trudno przetwarzalnych, jak kompozyty i polimery termoutwardzalne. W dalszej części rozdziału dokonano przeglądu badań nad metodami termochemicznymi (piroliza, zgazowanie, hydrotermalne przetwarzanie) i określono ich ograniczenia — wysokie zużycie energii i niską selektywność produktów. Na tej podstawie zidentyfikowano luki badawcze dotyczące efektywnego odzysku wartościowych związków z odpadów polimerowych. Sformułowano cele i zadania rozprawy, którymi są: opracowanie i optymalizacja procesu oksydacyjnego upłynniania (*oxidative liquefaction*) jako efektywnej metody recyklingu chemicznego dla różnych rodzajów odpadów. Zaplanowano w charakterze rozważanych surowców przyjąć cztery grupy materiałów: odpadowe łopaty elektrowni wiatrowych (ozn. WTBs), zużyte środki ochrony osobistej (ozn. PPE), odpady komunalne (ozn. MSW) oraz odpadowe, wycofane z eksploatacji panele fotowoltaiczne (ozn. PV). Celem jest uzyskanie surowców wtórnych oraz wpisanie się w ramy Gospodarki o Obiegu Zamkniętym (GOZ). Cel naukowy pracy zostały jasno przedstawiony. Przyjęty zakres i wynikający z niego plan badań z punktu widzenia celu pracy uznają za wystarczający.

Rozdział 2 *Materiały i metody* ma charakter metodyczny i stanowi bazę dla badań eksperymentalnych. Autor opisuje cztery grupy analizowanych materiałów i dla każdego rodzaju odpadu przedstawia normy związane z odpowiednimi oznaczeniami i badaniami a także uzyskane wyniki (m.in. analizy elementarnej). W dalszej części zaprezentowano konfigurację stanowiska badawczego do oksydacyjnego upłynniania — reaktor wysokociśnieniowy (obj. 500 ml)

pracujący w układzie wsadowym, w którym jako czynnik utleniający zastosowano nadtlenek wodoru (H_2O_2). Opisano plan doświadczeń, zmienne procesowe (temperatura, ciśnienie, czas reakcji, stężenie utleniacza, stosunek odpad–ciecz) oraz sposób oceny wydajności procesu – poprzez następujące parametry: TSR (*Total Solid Reduction* – wydajność degradacji) i OCC (*Oxygenated Chemical Compounds* – wydajność produkcji). W rozdziale przedstawiono także zastosowanie metod statystycznych – analizy wariancji (ANOVA) i metody powierzchni odpowiedzi (RSM) – do optymalizacji procesu i oceny istotności czynników wpływających na uzysk produktów. Dzięki temu rozdział ten stanowi podstawę dla wszystkich późniejszych eksperymentów, zapewniając spójność metodologiczną całej pracy i umożliwiając porównanie wyników między różnymi rodzajami odpadów.

W rozdziale 3 pt. *Eksperymentalne badania nad oksydacyjnym upłynnianiem łopat turbin wiatrowych (WTBs)* Doktorant opisuje wyniki badań doświadczalnych nad procesem oksydacyjnego upłynniania kompozytów polimerowych, stanowiących materiał zużytych łopat turbin wiatrowych. Autor wskazuje, że klasyczne metody recyklingu (składowanie, piroliza, mechaniczne rozdrabnianie) są nieefektywne energetycznie i nie zapewniają odzysku wartościowych surowców. Proponowane w pracy oksydacyjne upłynnianie, wykorzystujące środowisko wodne i nadtlenek wodoru (H_2O_2) jako utleniacz, pozwala na degradację żywic epoksydowych i zachowanie integralności włókien szklanych. W badaniach określono wpływ pięciu kluczowych parametrów: temperatury (250–350°C), ciśnienia (20–40 bar), czasu (30–90 min), stężenia utleniacza (15–45%) oraz stosunku odpad–ciecz (5–25%). Wyniki wskazały na niemal całkowitą degradację żywicy (95–100%) przy jednoczesnym odzysku włókien o nienaruszonej strukturze. Rozdział kończy się wnioskiem, że badany proces ten może być skalowalną metodą recyklingu kompozytów w energetyce wiatrowej.

Tytuł kolejnego rozdziału (nr 4): *Analiza produktów procesu oksydacyjnego upłynniania łopat turbin wiatrowych* zwiastuje jego zawartość. Autor pogłębia w nim analizę produktów otrzymanych po procesie upłynniania. Przedstawia charakterystykę strukturalną i chemiczną próbek przed i po reakcji, z wykorzystaniem technik FTIR i GC-FID. W trakcie badań zidentyfikowano lotne kwasy tłuszczowe (VFAs – głównie kwas octowy i mrówkowy) – jako główne produkty ciekłe, o stężeniach rzędu 210 g/kg. Wykazano, że najbardziej korzystne parametry procesu to 250°C, 35 bar, 45 min, 22,5% H_2O_2 i stosunek odpadu do cieczy 1:20. Osiągnięto kompromis między wydajnością degradacji a zużyciem energii. Otrzymany materiał zachował dobre właściwości mechaniczne, a produkty ciekłe mają potencjał jako dalszy surowiec do syntez chemicznych lub komponenty biopaliw. Autor podkreśla, że oksydacyjne upłynnianie może stanowić zrównoważoną alternatywę wobec pirolizy i spalania.

W rozdziale 5 pracy zatytułowanym *Porównanie oksydacyjnego upłynniania łopat turbin wiatrowych i odpadów PPE* badania Doktoranta dotyczyły dwóch kolejnych typów odpadów: łopat turbin (WTBs) oraz zużytych środków ochrony osobistej (PPE), które w czasie pandemii COVID-19 gwałtownie zwiększyły swój udział w strumieniu odpadów. Celem badań była ocena możliwości zastosowania jednej technologii do obu strumieni polimerowych. Wykazano, że PPE (składające się głównie z tworzyw typu PP i PE) ulegają degradacji szybciej i w niższych temperaturach (200–250°C), osiągając wydajność degradacji 85–90%, przy niższym zużyciu energii. Odpady typu WTBs wymagają wyższych temperatur (~350°C), dłuższych czasów reakcji i wykazują większy udział popiołu (ok. 58%). Wnioskiem jest konieczność indywidualnej optymalizacji parametrów dla różnych typów odpadów. PPE uznano za bardziej perspektywiczny materiał dla recyklingu chemicznego, a WTBs – za wsad wymagający dalszego dopracowania procesu.

Kolejnemu typowi odpadów (MSW) poświęcono rozdział nr 6: *Przegląd wytwarzania komunalnych odpadów stałych (MSW) – globalnie i w Polsce*, który stanowi przeglądowy wstęp do dalszych badań nad upłynnianiem odpadów komunalnych. Przedstawiono tutaj dane charakteryzujące sektor odpadów komunalnych – w ujęciu globalnym: ponad 1,2 mld t rocznie,

prognoza 2 mld t w 2025 r. oraz krajowym – Polska generuje ok. 330 kg odpadów na mieszkańca, poniżej średniej UE (480 kg). Omówiono obecne systemy gospodarowania odpadami (składowanie, mechaniczno – biologiczne przetwarzanie, spalanie, recykling) oraz ich ograniczenia. Szczególną uwagę poświęcono niedostatecznemu rozwojowi technologii waste-to-energy (WTE) i potrzebie wdrożenia chemicznego recyklingu, np. oksydacyjnego upłynniania. Wskazano, że MSW zawierają ok. 10–12% tworzyw sztucznych, co stanowi potencjał surowcowy i energetyczny. Autor postuluje w nim integrację innowacyjnych metod z systemem GOZ w Polsce.

Rozdział 7 pt. *Porównanie oksydacyjnego upłynniania MSW i odpadów PPE* prezentuje eksperymentalne porównanie procesów dla dwóch strumieni odpadów: MSW (odpady komunalne) i PPE. Wyniki analiz FTIR wykazały, że PPE mają bardziej jednorodny skład polimerowy, co sprzyja wydajniejszej konwersji. Odpady komunalne MSW ze względu na heterogeniczność dają niższe uzyski i wymagają optymalizacji parametrów i warunków procesowych. Zbadano wpływ temperatury, stężenia utleniacza i stosunku odpad–ciecz na uzysk tlenowych związków organicznych (OCC) oraz całkowitej redukcji masy stałej (TSR). Optymalne warunki dla PPE to 200°C, 30 wt.% H₂O₂, 3 wt.% odpad; dla MSW – 200°C, 45 wt.% H₂O₂, 3 wt.% odpad. Wyniki dowodzą, że wsad w postaci PPE umożliwi osiągnięcie bardziej energooszczędnego i skalowalnego procesu recyklingu chemicznego, natomiast zastosowanie MSW wymagać będzie dopracowania metod rozdziału i selekcji frakcji.

Kolejnemu z rozważanych odpadów – paneli fotowoltaicznych po zakończeniu eksploatacji – poświęcony jest rozdział 8 *Utylizacja paneli fotowoltaicznych po zakończeniu eksploatacji*. Omówiono w nim rosnący problem odpadów fotowoltaicznych (PV), których ilość wzrasta wraz z upowszechnieniem wytwarzania energii w technologii PV. Przedstawiono analizę składu materiałowego modułów PV (szkło, aluminium, krzem, polimery EVA i PET) oraz potencjalne metody recyklingu: mechaniczne, chemiczne i termiczne. Autor wskazuje na możliwość adaptacji metod oksydacyjnego upłynniania do odzysku polimerów i związków organicznych z warstw osłonowych paneli. Zidentyfikowano bariery technologiczne (adhezja warstw, zanieczyszczenia metalami) oraz konieczność zintegrowania procesów chemicznych z odzyskiem szkła i krzemu. Rozdział pełni funkcję pomostu między badaniami nad odpadami polimerowymi a innymi komponentami infrastruktury wytwórczej energii odnawialnej.

W rozdziale 9 pt. *Podsumowanie rozprawy, wnioski ogólne i perspektywy dalszych badań* Autor syntetyzuje otrzymane i opisane we wcześniejszych rozdziałach (a podstawowo w publikacjach stanowiących poszczególne składowe cyklu) wyniki badań nad oksydacyjnym upłynnianiem różnych strumieni odpadów (WTBs, PPE, MSW). Wykazano, że proces jest efektywny energetycznie, pozwala na wysoką degradację polimerów (do 100%) i uzysk wartościowych produktów (VFAs, OCCs). Zidentyfikowano kluczowe parametry: temperatura, stężenie H₂O₂ i stosunek odpad–ciecz. Oksydacyjne upłynnianie oceniono jako uniwersalną, niskoemisyjną technologię przetwarzania odpadów polimerowych, wpisującą się w gospodarkę o obiegu zamkniętym. W perspektywie autor wskazuje potrzebę badań nad automatyzacją, odzyskiem ciepła oraz analizą LCA procesów w skali przemysłowej.

Publikacje przedstawione do oceny w ramach cyklu publikacji i ujęte w monografię ukazały się w latach 2023-2025 w zagranicznych czasopiśmie naukowych o wysokim i bardzo wysokim wskaźniku wpływu (IF). Należy podkreślić, że sumaryczny IF czasopism, w których zostały opublikowane prace wchodzące w skład powyższego cyklu wynosi blisko 50 co uprawnia do stwierdzenia, że zarówno jakość wykonanych badań jak i poziom naukowy Doktoranta są bardzo wysokie. Zdecydowanego podkreślenia wymaga fakt, iż we wszystkich publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem a jego wkład zgodnie z zawartymi w publikacjach deklaracjami oraz szczegółowym opisem zawartym w pierwszej części rozprawy jest fundamentalny. Świadczy to o istotnej umiejętności samodzielnego planowania i wykonywania często

złożonych eksperymentów badawczych, obróbki uzyskanych wyników oraz przygotowywania na ich bazie wartościowych publikacji naukowych, które są pozytywnie odbierane przez społeczność naukową (całkowita liczba cytowań wszystkich publikacji – a więc nie tylko tych stanowiących cykl - wyniosła 175 wg bazy SCOPUS).

Kompozycja całości pracy, na którą składają się omówione powyżej rozdziały jest przejrzysta i syntetyczna. Zaprezentowane w pracy publikacje dobrano w sposób przemyślany oraz trafny. Należy podkreślić, iż ujęte w cykl publikacji artykuły są bardzo obszerne, a zastosowane w nich zróżnicowane metody i techniki badawcze, często bardzo nowoczesne, uzupełnione wnikliwą dyskusją wyników badań potwierdzają wysokie umiejętności naukowe Doktoranta.

Ponieważ przedstawione w cyklu publikacji pozycje ukazały się w renomowanych międzynarodowych periodykach naukowych, sądzę że ich szczegółowa krytyczna analiza jest w tym przypadku nieuzasadniona. Manuskrypty kierowane do publikacji w czasopismach o tak wysokiej randze poddawane są szczegółowej analizie na poziomie wydawniczym (przez Wydawcę), a następnie zanonimizowanemu procesowi recenzji, w którym bierze udział kilku niezależnych recenzentów. Dokonują oni zwyczajowo bardzo krytycznej oceny przedłożonego materiału co ma na celu wychwycenie błędów i niedociągnięć, aby je przed publikacją finalnej wersji autor miał szansę poprawić czy usunąć. Można zatem założyć, iż stanowiący zawartość poszczególnych publikacji materiał był już poddany szczegółowej analizie i weryfikacji merytorycznej.

Podsumowując powyższe, stwierdzam że przedstawiony cykl publikacji został dobrany prawidłowo, przez co całościowy zakres pracy opisanej w poszczególnych pozycjach jest spójny i wyczerpujący.

2.2 Ocena prawidłowości wyboru tematu

Temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Hamzy Mumtaza, poświęconej opracowaniu i analizie procesu oksydacyjnego upłynniania odpadów polimerowych pochodzących z różnych sektorów gospodarki (łopaty turbin wiatrowych, odpady PPE, MSW i panele fotowoltaiczne), należy uznać za wyjątkowo trafny, aktualny i ważny z punktu widzenia zarówno naukowego, jak i praktycznego. Problematyka zagospodarowania odpadów tworzywowych i kompozytowych, zwłaszcza z odnawialnych źródeł energii, stanowi jedno z największych wyzwań współczesnej gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). Wybór tematu jest odpowiedzią na realną lukę badawczą w zakresie recyklingu chemicznego materiałów termoutwardzalnych, które dotąd były w dużej mierze deponowane lub spalane. Autor podjął próbę opracowania nowej, zrównoważonej technologii chemicznego przetwarzania tego typu odpadów, wykorzystując oksydacyjne upłynnianie (*oxidative liquefaction*) – proces dotąd słabo zbadany, a jednocześnie obiecujący ze względu na umiarkowane warunki prowadzenia reakcji, niską energochłonność i potencjał odzysku wartościowych produktów ciekłych.

Temat rozprawy jest również doskonale wpisany w priorytety polityki środowiskowej Unii Europejskiej – m.in. Europejski Zielony Ład, strategię dekarbonizacji przemysłu i gospodarkę surowcami wtórnymi. Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, łączący wiedzę z zakresu inżynierii chemicznej, technologii środowiska, materiałoznawstwa i analizy cyklu życia (LCA). Obejmuje zarówno wymiar poznawczy (zrozumienie mechanizmów degradacji polimerów w środowisku oksydacyjnym), jak i aplikacyjny (ocena możliwości wykorzystania produktów upłynniania w przemyśle).

Podsumowując, należy stwierdzić, że wybór tematu pracy jest w pełni uzasadniony naukowo, gospodarczo i środowiskowo. Rozprawa dotyczy zagadnienia o dużym znaczeniu strategicznym, a podejście autora świadczy o świadomości współczesnych wyzwań w zakresie recyklingu materiałów polimerowych i transformacji energetycznej. Tego, iż przedmiot rozważań został wybrany prawidłowo i ma on znaczącą perspektywę zarówno badawczą jak i

wdrożeniową dowodzi fakt, iż realizowane przez Doktoranta badania uzyskały wsparcie finansowe w ramach programu badawczego finansowanego przez NCN w ramach konkursu OPUS 2 - co jest najlepszym potwierdzeniem rangi i istotności analizowanej oraz rozwijanej w pracy tematyki.

2.3 Prawdliwość rozważań, uzyskanych wyników i wniosków oraz uwagi krytyczne

Rozważania przedstawione w rozprawie cechują się poprawnością merytoryczną i logiczną spójnością. Autor konsekwentnie prowadzi tok wywodu — od identyfikacji problemu badawczego, przez przegląd literatury i uzasadnienie wyboru metod, aż po analizę wyników i sformułowanie wniosków. Układ pracy jest klarowny, a zastosowana metodologia — poprawna z punktu widzenia zarówno inżynierii środowiska jak i inżynierii chemicznej i procesowej. Badania eksperymentalne wykonano w sposób staranny i powtarzalny, z zachowaniem zasad poprawności pomiarowej i analitycznej. Wyniki zostały opracowane przy użyciu właściwych metod statystycznych, m.in. analizy wariancji (ANOVA) i metody powierzchni odpowiedzi (RSM), co pozwoliło na obiektywną ocenę wpływu poszczególnych parametrów procesowych. Interpretacje danych są logiczne i oparte na wiedzy literaturowej, a wnioski mają charakter syntetyczny i nie wykraczają poza uzyskane wyniki. Zaletą jest również wielowątkowe porównanie różnych strumieni odpadów (WTBs, PPE, MSW, PV), które pozwala uchwycić różnice w ich reaktywności i efektywności upłynniania.

Na szczególne uznanie zasługuje kompleksowe podejście do procesu oksydacyjnego upłynniania, uwzględniające zarówno analizę właściwości produktów (FTIR, GC-FID, SEM-EDS), jak i ocenę potencjału wdrożeniowego technologii. Wnioski są dobrze uzasadnione eksperymentalnie, a przedstawione zależności ilościowe między parametrami procesu a uzyskami produktów świadczą o rzetelnej analizie danych.

Zawartość rozprawy dowodzi, że Doktorant bardzo dobrze znajduje się w przedmiotowej problematyce. Do treści zawartych w rozprawie nie mam uwag merytorycznych, nie stwierdzam w tym zakresie żadnych uchybień i oceniam znajomość przedmiotu zagadnienia przez Doktoranta – w tym Jego przygotowanie zawodowe i naukowe – bardzo pozytywnie.

Przyczynę do podjęcia pogłębionej dyskusji naukowej stanowią natomiast zagadnienia, które zamieszczam poniżej, z prośbą o komentarz do nich w trakcie obrony pracy:

- 1) w rozdziale 1 Doktorant wymienia obecnie stosowane technologie służące zagospodarowaniu odpadowych materiałów o charakterze kompozytowym i sygnalizuje, iż recykling chemiczny będzie prawdopodobnie najbardziej perspektywicznym kierunkiem, umożliwiającym odzysk z nich wartościowych produktów. Pytanie brzmi: czy w obecnej chwili istnieją alternatywne do wymienionych technologie recyklingu (nie tylko chemicznego) takich materiałów i jakie poziomy gotowości technologicznej można im przypisać? Informacja o komercyjnie dostępnych technologiach chemicznego recyklingu i ich porównanie z proponowaną metodą oksydacyjnego upłynniania pomogłaby mocniej uwypuklić innowacyjność proponowanego rozwiązania.
- 2) czy każdemu ze wskazanych rodzajów odpadów (WTB, PV, PPE, MSW) można przypisać osobny kod odpadu i czy są one poddawane selektywnej zbiórce (pytanie szczególnie w kontekście PPE) czy też nie – i wówczas należy jako elementy docelowej instalacji do recyklingu chemicznego zaplanować dodatkowe instalacje do sortowania/wydzielania odpadów typu PPE np. z ogólnego strumienia MSW? Czy poza jednostkami sektora ochrony zdrowia istnieje organizacyjna bądź formalno – prawna możliwość selektywnej zbiórki takiego materiału aby zapewnić jego podaż dla planowanej instalacji recyklingu w ilości umożliwiającej ekonomikę jej funkcjonowania?
- 3) na str. 27 Doktorant pisze „*The presence of trace elements, including copper and rare earth elements such as cerium, praseodymium, and neodymium, suggests a potential*

resource value” a następnie stawia tezę, iż: „*the relatively low concentrations of these elements underscore the economic challenges associated with their recovery from waste materials*”. Co było podstawą przyjęcia takiej tezy oraz czy (i ewentualnie w jakim stopniu) proponowany proces oksydacyjnego upłynniania może umożliwić (bądź unieвозмоwić) dalszy odzysk składowych metali śladowych ziem rzadkich? Taki odzysk dodatkowych wartościowych surowców z pewnością miałby wpływ na ekonomikę procesu i możliwość szerszego wdrożenia technologii.

- 4) co zdecydowało o wyborze odpadu typu MSW (jako odpadu komunalnego) dla analiz i czy nie korzystniej byłoby stosować jako surowiec materiał typu RDF (SRF), którego właściwości (w tym morfologia) są znacznie bardziej ujednolicone w stosunku do MSW. W konsekwencji liczba procesów jednostkowych związanych z przygotowaniem surowca (np. proces redukcji Cl) przed właściwymi reakcjami oksydacyjnego upłynniania mogła by zostać zredukowana?
- 5) czy na podstawie uzyskanych wyników można oszacować, ile energii netto zużywane jest w trakcie procesu oksydacyjnego upłynniania (ciepło, elektryczność, praca sprężania, chłodzenie) w odniesieniu do ilości i wartości energetycznej uzyskanych produktów? To informacje cenne z uwagi na określenie, czy po powiększeniu skali proces ma szansę być energetycznie samowystarczającym, czy wymagać będzie zasilania zewnętrznego (co przełoży się na koszty eksploatacyjne). Z kolei benchmark wobec istniejących technologii recyklingu chemicznego: pirolizy, hydrotermalnego rozkładu czy zgazowania może pozwolić na określenie czy proponowany proces może kosztowo, wydajnościowo lub środowiskowo cechować się przewagami konkurencyjnymi – to ważne z punktu widzenia przyszłego inwestora (Doktorant – słusznie zresztą – wspomina o dalszym rozwoju i komercjalizacji tej technologii).
- 6) czy na podstawie uzyskanych wyników można przewidywać wydajności i skład analogicznych procesów dla reaktorów o działaniu ciągłym (przepływowych)?
- 7) jakie branże mogą być zainteresowane wytworzonymi produktami recyklingu chemicznego (produkty stałe i ciekłe – jaka może być chłonność rynku i główni odbiorcy?).

3. Wnioski końcowe

Rozprawa mgr inż. Hamzy Mumtaza obrazuje kompleksowe podejście do opracowania naukowego dotyczącego procesu oksydacyjnego upłynniania odpadów polimerowych – innowacyjnej metody chemicznego recyklingu, umożliwiającej odzysk surowców z trudnych do przetworzenia materiałów. Badania objęły cztery reprezentatywne strumienie odpadów: łopaty turbin wiatrowych (WTB), środki ochrony osobistej (PPE), odpady komunalne (MSW) oraz zużyte panele fotowoltaiczne (PV). Autor udowodnił, że proces oksydacyjnego upłynniania, prowadzony w umiarkowanych warunkach (200–350°C, 20–40 bar) z wykorzystaniem nadtlenu wodoru jako czynnika utleniającego, pozwala na efektywne rozkładanie matryc polimerowych i przekształcanie ich w wartościowe produkty ciekłe – głównie tlenowe związki organiczne (OCCs), takie jak kwas octowy, mrówkowy, propionowy i alkohole. Zastosowanie metod statystycznych (ANOVA, RSM) umożliwiło optymalizację procesu i wyznaczenie kluczowych parametrów determinujących jego efektywność.

W badaniach uzyskano wysokie wskaźniki redukcji masy stałej (TSR/TPD) – powyżej 95% dla PPE i MSW – oraz znaczące uzyski produktów ciekłych (nawet 213 g/kg dla PPE). Dla łopat turbin wiatrowych proces umożliwił niemal całkowitą degradację żywic epoksydowych przy zachowaniu włókien szklanych, natomiast dla PV efektywność była ograniczona przez skład mineralny i obecność metali. Autor wykazał także egzotermiczny charakter reakcji, co

potwierdza potencjalną energetyczną opłacalność procesu przy jego odpowiedniej integracji technologicznej.

Opracowana metoda została oceniona jako uniwersalna i elastyczna, możliwa do zastosowania dla różnych typów odpadów zawierających polimery termoplastyczne i termoutwardzalne. Uzyskane produkty posiadają wartość chemiczną i energetyczną, mogą służyć jako komponenty biopaliw lub surowce do syntez organicznych.

W warstwie aplikacyjnej autor podkreślił konieczność dalszego rozwoju technologii w kierunku procesów ciągłych (przepływowych), integracji z odzyskiem ciepła oraz zastosowania katalizatorów, co pozwoliłoby zwiększyć wydajność i skalowalność rozwiązania. Zwrócono też uwagę na potrzebę analizy aspektów środowiskowych i ekonomicznych, zwłaszcza przy przetwarzaniu odpadów z zawartością fluorowców i metali ciężkich.

Podsumowując, przeprowadzone badania wykazały, że oksydacyjne upłynnianie jest obiecującą, niskoemisyjną metodą recyklingu chemicznego, która może stać się ważnym elementem gospodarki o obiegu zamkniętym. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy o termochemicznej konwersji odpadów polimerowych i stanowi solidną podstawę do dalszych prac badawczych i wdrożeniowych w obszarze zrównoważonych technologii przetwarzania odpadów.

Zakres zrealizowanych prac stanowi oryginalny dorobek Doktoranta a wyniki uzyskane w trakcie realizacji pracy dostarczają oprócz zasygnalizowania elementów naukowych ważnych wniosków utylitarnych, są one przez to cenne z praktycznego punktu widzenia.

Na szczególne uznanie zasługuje interdyscyplinarny charakter pracy – łączący elementy inżynierii środowiska, inżynierii chemicznej i materiałowej – oraz jej wymiar praktyczny. Wyniki uzyskane w ramach badań mogą stanowić podstawę dalszych prac wdrożeniowych i rozwojowych w obszarze zrównoważonych technologii recyklingu.

Praca jest starannie opracowana redakcyjnie, poprawna językowo i logicznie uporządkowana. Wskazane wcześniej uwagi dyskusyjne mają charakter uzupełniający i nie wpływają na ogólną, bardzo pozytywną ocenę pracy.

Podsumowując powyższe, stwierdzam co następuje:

- 1) Na podstawie przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej, biorąc pod uwagę przedstawione wcześniej uwagi i spostrzeżenia stwierdzam, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Hamzę Mumtaza rozprawa pt. „*Experimental analysis of the waste hydrothermal treatment process*” spełnia w całości określone w Art. 13.1 przywołanej w pkt. 1 Ustawy warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim.
- 2) Rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka; dowodzi także Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w tym planowania i realizacji bardzo szerokiego zakresu badań eksperymentalnych, dyskusji oraz interpretacji uzyskanych wyników.
- 3) Praca posiada wartościowe aspekty użytkowe, osiągnięte wyniki mogą być przydatne oraz dalej rozwijane dla celów zastosowań w sektorze inżynierii środowiska, inżynierii chemicznej i gospodarki odpadami.

Wobec powyższych faktów wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach o dopuszczenie Pana mgr inż. Hamzy Mumtaza do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.