



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**  
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej  
Katedra Techniki Ciepłej i Ochrony Środowiska  
Prof. dr hab. Aneta Magdziarz

Kraków, 7 stycznia 2026 r.

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**Pana mgr inż. Rafała Łysowskiego**  
**pt.: „Związki o strukturze typu perowskitu i spinelu zawierające**  
**w składzie żelazo i miedź do zastosowań w procesach CLC i CLOU”**  
**wykonanej pod opieką naukową**  
**dr hab. inż. Eweliny Ksepko, prof. PWR**  
**na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej**

### **1. Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Łysowskiego została opracowana na podstawie zawiadomienia nr 39/12/D05/2025 z dnia 9 grudnia 2025 roku, którego podstawą była uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Chemiczna nr 209/16/RDND05/2024-2028 z dnia 3 grudnia 2025 r. w sprawie wyznaczenia recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria chemiczna Panu mgr inż. Rafałowi Łysowskiemu.

### **2. Wprowadzenie**

Dynamiczny rozwój przemysłu oraz nowoczesnych technologii energetycznych prowadzi do systematycznego wzrostu zapotrzebowania na energię oraz surowce energetyczne. Pomimo intensywnego rozwoju i zastosowania odnawialnych źródeł energii, paliwa kopalne nadal odgrywają istotną rolę w globalnym bilansie energetycznym, zwłaszcza w sektorach energetyki zawodowej, przemysłu chemicznego, cementowego oraz hutnictwa. Konsekwencją tej sytuacji jest wysoka emisja ditlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), która jest istotnym czynnikiem ograniczającym dalszy rozwój technologiczny oraz ekonomiczny wielu gałęzi przemysłu.

W związku z zaostrzającymi się regulacjami środowiskowymi, rosnącymi kosztami emisji  $\text{CO}_2$  oraz koniecznością zwiększania wydajności procesów energetycznych, istnieje potrzeba wdrażania rozwiązań technologicznych umożliwiających redukcję emisji, przy możliwie niskim nakładzie energetycznym i inwestycyjnym. Szczególne znaczenie zyskują technologie wychwytu

i separacji ditlenku węgla (ang. *Carbon Capture Utilisation and Storage*, CCUS). Jednym z perspektywicznych rozwiązań jest również spalanie w pętli chemicznej (ang. *Chemical Looping Combustion*, CLC). Technologia ta umożliwia prowadzenie procesu spalania z jednoczesnym, wewnętrznym wydzieleniem strumienia CO<sub>2</sub> o wysokiej czystości, bez konieczności stosowania klasycznych i energochłonnych metod separacji gazów. Technologia CLC jest stosowana z powodzeniem w skali pilotażowej podczas spalania węgla, paliw odpadowych oraz biomasy. Podstawą procesu CLC jest wykorzystanie stałych nośników tlenu, najczęściej w postaci tlenków metali, które cyklicznie stosowane są w reakcjach redukcji i utleniania. Proces odbywa się w dwóch sprzężonych reaktorach: reaktorze paliwowym, w którym paliwo reaguje z nośnikiem tlenu oraz reaktorze powietrznym, w którym zredukowany nośnik jest ponownie utleniany powietrzem. Taki układ eliminuje bezpośredni kontakt paliwa z azotem zawartym w powietrzu, dzięki czemu możliwe jest otrzymanie gazów procesowych, które zawierają niemal wyłącznie CO<sub>2</sub> i parę wodną. Wspomniane nośniki tlenu są kluczowym elementem decydującym o skuteczności procesu CLC, dlatego badania prowadzone w ostatnich latach koncentrują się na opracowaniu materiałów o wysokiej pojemności transportu tlenu, dobrej reaktywności, odporności mechanicznej oraz stabilności w warunkach wielokrotnych cykli redoks. Szczególną uwagę poświęca się nośnikom na bazie żelaza, które ze względu na niski koszt, dostępność oraz neutralność środowiskową są uznawane za jedne z najbardziej perspektywicznych materiałów do zastosowań przemysłowych.

Podsumowując, *Chemical Looping Combustion* stanowi istotny kierunek rozwoju nowoczesnych technologii procesów spalania, umożliwiający skuteczną redukcję emisji CO<sub>2</sub> przy zachowaniu wysokiej efektywności energetycznej. Potencjał aplikacyjny CLC może w przyszłości odegrać ważną rolę w instalacjach energetycznych i chemicznych, szczególnie w sektorach wymagających intensywnego wykorzystania paliw kopalnych.

W związku z powyższym należy podkreślić, że rozprawa doktorska Pana Rafała Łysowskiego podejmuje aktualny i ważny temat badawczy dotyczący nowoczesnych metod spalania paliw i odpadów w chemicznej pętli tlenkowej (CLC) oraz chemicznej pętli z wydzieleniem tlenu (ang. *Chemical Looping with Oxygen Uncoupling*, CLOU), ze szczególnym uwzględnieniem przygotowania i modyfikacji stałych nośników tlenu. Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej wpisuje się w bieżące kierunki badań nad nowoczesnymi procesami spalania paliw stałych, ukierunkowanymi na zwiększenie efektywności procesowej, a przede wszystkim na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant skoncentrował swoje badania na jednym z kluczowych parametrów technologii CLC i CLOU jakim jest trwałość fizykochemiczna stałych nośników tlenu podczas długotrwałej pracy. Wybór materiałów o strukturze spinelu i perowskitu, zawierających żelazo i miedź, jest w pełni uzasadniony zarówno z punktu widzenia właściwości redoks, jak i potencjału aplikacyjnego oraz ekonomicznego. Podczas realizacji pracy do analizy badanych materiałów Doktorant zastosował zaawansowane techniki analityczne (metody chemiczne i instrumentalne), m.in. dyfrakcję rentgenowską (XRD), skaningową mikroskopię elektronową (SEM) ze spektroskopią dyspersji energii (EDS), spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR) oraz analizę termogravimetryczną, (TGA) świadczy o interdyscyplinarnym podejściu do problemu oraz o dojrzałości naukowej Doktoranta i umiejętności właściwego doboru metod badawczych do stawianych celów naukowych.

Stwierdzam, że podjęta tematyka badawcza posiada wysoką wartość naukową i aplikacyjną, a jej realizacja jest zgodna z bieżącymi trendami światowymi w dziedzinie technologii CLC i CLOU. Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Łysowskiego pt. „Związki o strukturze typu perowskitu i spinelu zawierające w składzie żelazo i miedź do zastosowań w procesach CLC i CLOU” stanowi dojrzałe i merytorycznie uzasadnione opracowanie naukowe, spełniające

wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria chemiczna.

### 3. Ocena tematu rozprawy i jej zakres

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Łysowskiego została zrealizowana w ramach projektu badawczego NCN nr 2020/37/B/ST5/01259 pt. „Zrozumienie zjawiska degradacji stałych nośników tlenu podczas cyklicznych reakcji redoks poprzez realizację badań eksperymentalnych i opracowanie strategii jego eliminacji”.

Recenzowaną rozprawę doktorską przygotowano w formie pracy złożonej z artykułów naukowych. Cykl publikacji obejmuje trzy artykuły naukowe, opublikowane w renomowanych czasopismach z listy JCR tj. *Waste Management* (2 artykuły) i *Journal of Environmental Management*, oba o wysokim współczynniku wpływu (IF: WM – 7.1, JEM – 8.4). Praca składa się z 9 rozdziałów obejmujących: wstęp, cel i zakres pracy, materiały i metody, przedstawienie artykułów będących podstawą rozprawy, podsumowanie i wnioski końcowe, bibliografię oraz prezentację dorobku naukowego Doktoranta.

Przed rozdziałem pt. „Wstęp” Doktorant zamieścił streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim, w których w sposób syntetyczny zaprezentował tematykę i zakres pracy oraz najważniejsze wyniki badań, co umożliwia szybkie zapoznanie się z istotą rozprawy i uzyskanymi rezultatami. Następnie mgr inż. Rafał Łysowski zamieścił spis publikacji wchodzących w skład cyklu. We wszystkich wymienionych artykułach jest on pierwszym autorem; nie pełnił natomiast funkcji autora korespondencyjnego oraz nie przedstawił szczegółowej informacji dotyczącej zakresu swojego merytorycznego wkładu w przygotowanie poszczególnych publikacji.

W rozdziale pt. „Wstęp” Doktorant dokonał omówienia problematyki spalania w chemicznej pętli tlenkowej (CLC) oraz chemicznej pętli z wydzielaniem tlenu (CLOU), uwzględniając zarówno ich podstawy teoretyczne, jak i aktualny stan rozwoju instalacji pilotażowych oraz podkreślając znaczenie i potencjał aplikacyjny tych technologii. Istotnym elementem tego rozdziału jest szczegółowa analiza roli stałych nośników tlenu w procesach CLC i CLOU. Doktorant scharakteryzował wymagania stawiane tego typu materiałom, obejmujące zdolność transportu tlenu, reaktywność z paliwami, stabilność fizykochemiczną oraz odporność mechaniczną w warunkach pracy reaktorów ze złożem fluidalnym oraz przeanalizował stałe nośniki tlenu uwzględniając ich pochodzenie (tj. nośniki naturalne i syntetyczne). Następnie Doktorant skoncentrował się na stałych nośnikach tlenu o strukturze spinelu i perowskitu, które stanowią główny przedmiot recenzowanej rozprawy. Przeanalizował ich właściwości mechaniczne, strukturę krystalograficzną podkreślając złożoną budowę omawianych związków, ale również możliwości zastosowania w różnych obszarach inżynierii chemicznej i materiałowej.

W drugim rozdziale pt. „Cel i zakres pracy” Doktorant przedstawił główny cel pracy, którym „było opracowanie nowych stabilnych fizykochemicznie stałych nośników tlenu o strukturze perowskitu i spinelu, zawierających Cu i Fe oraz przetestowanie ich w zakresie spalania paliw w procesie spalania w chemicznej pętli tlenkowej”. Ponadto postawił cztery hipotezy badawcze, dotyczące m.in. wpływu modyfikacji składu chemicznego nośników tlenu na stabilność ich struktury krystalicznej, zdolność do transportu tlenu, reaktywność z paliwami oraz odporność na oddziaływanie popiołów pochodzących ze spalania biomasy. Takie podejście świadczy o przemyślanej koncepcji badawczej oraz dojrzałości naukowej Doktoranta. Reasumując, uważam, że cel i zakres pracy zostały sformułowane poprawnie, a wybór materiałów do badań był trafny i uzasadniony.

W rozdziale 3 pt. „Materiały i metody” Doktorant opisał metodykę syntezy stałych nośników tlenu o strukturze perowskitu i spinelu oraz uzasadnił wybór metody mieszania mechanicznego

i kalcynacji. Następnie zaprezentował zakres badań strukturalnych, morfologicznych oraz mechanicznych otrzymanych materiałów tlenkowych. Zastosowanie dyfraktometrii rentgenowskiej pozwoliło na ocenę struktury krystalicznej syntezowanych związków, natomiast badania mikroskopowe umożliwiły analizę budowy morfologicznej. Wykonano również badania wytrzymałości mechanicznej nośników tlenu, które są istotne z punktu widzenia ich pracy w reaktorach ze złożem fluidalnym. Szczególnie istotną część metodyki stanowią badania termogravimetryczne, które wykorzystano do oceny zdolności transportu tlenu, stabilności fizykochemicznej nośników oraz ich reaktywności w warunkach wielokrotnych cykli redukcji i utleniania. Doktorant opisał zarówno badania wstępne, jak i długotrwałe testy redoks, a także eksperymenty związane ze spalaniem paliw stałych i gazowych, co pozwoliło na kompleksową ocenę przydatności materiałów do zastosowań w procesach CLC i CLOU.

Rozdziały 4–6 rozprawy doktorskiej stanowią zasadniczą część pracy i obejmują cykl trzech publikacji naukowych, które tworzą logicznie powiązaną całość. Przedstawione artykuły dotyczą przygotowania, charakterystyki i zastosowania stałych nośników tlenu o strukturze spinelu i perowskitu, co jest zgodne z celem i zakresem pracy sformułowanym w rozdziale 2.

Artykuł I pt. „*Cu<sub>x</sub>Mg<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-type spinels as potential oxygen carriers for waste wooden biomass combustion*”, autorzy: R. Łysowski R., E. Ksepko opublikowany w *Waste Management* (2024, 175: 146–156) dotyczy oceny przydatności spinelowych stałych nośników tlenu Cu<sub>x</sub>Mg<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> do zastosowania w procesach spalania biomasy drzewnej w technologii CLC i CLOU. Zaproponowano i przebadano serię dziewięciu materiałów o zmiennym stosunku miedzi i magnezu, analizując ich właściwości redoks, zdolność transportu tlenu, reaktywność względem paliwa stałego oraz trwałość mechaniczną w wysokich temperaturach. Badania wykazały, że otrzymane ferryty magnezowo-miedziowe charakteryzują się bardzo dobrą reaktywnością wobec biomasy drzewnej oraz wysoką efektywnością konwersji paliwa, sięgającą niemal 99%. Nośniki te wykazują jednocześnie bardzo korzystne właściwości w procesie CLOU, umożliwiając wydzielanie tlenu cząsteczkowego i intensyfikację spalania paliw stałych. Ponadto, stwierdzono, że domieszkowanie magnezem znacząco poprawia wytrzymałość mechaniczną spineli, co ma kluczowe znaczenie dla ich zastosowania w reaktorach ze złożem fluidalnym. Autorzy wskazują, że optymalny zakres temperatur pracy badanych nośników tlenu mieści się w przedziale 900–950 °C.

Artykuł II pt. „*Increased stability of CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> oxygen carriers in biomass combustion by Mg doping*”, autorzy R. Łysowski, E. Ksepko i H. Ra opublikowany w *Waste Management* (2025, 199: 1–12) poświęcony jest dalszej analizie wpływu domieszkowania magnezem na stabilność CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> w warunkach spalania biomasy. W tym przypadku przeanalizowano stałe nośniki tlenu do spalania różnego rodzaju biomasy lignocelulozowej. Zwrócono szczególną uwagę na wpływ składu popiołu biomasy (obecność metali alkalicznych) na degradację stałego nośnika tlenu. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że odpowiednio dobrany stopień domieszkowania magnezem prowadzi do ograniczenia degradacji strukturalnej nośnika oraz zmniejszenia podatności na defluidyzację złoża. Przeprowadzone badania potwierdziły, że modyfikacja magnezem składu chemicznego CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> stanowi skuteczne narzędzie zwiększania stabilności nośników tlenu w procesach spalania biomasy, co ma bezpośrednie znaczenie dla dalszego rozwoju i potencjalnej komercjalizacji technologii CLC i CLOU.

Ostatni artykuł cyklu, pt. „*Ti doping as an effective strategy for increasing the stability of strontium-copper-iron perovskite-based oxygen carriers*” autorstwa R. Łysowskiego i E. Ksepko, opublikowany w czasopiśmie *Journal of Environmental Management* (2025, 393: 127262), poświęcony jest badaniom nad poprawą stabilności perowskitowych stałych nośników tlenu na bazie układu stront–miedź–żelazo poprzez domieszkowanie tytanem. W pracy przedstawiono

wyniki badań dotyczące wpływu dodatku tytanu na stabilność strukturalną, właściwości redoks oraz trwałość mechaniczną perowskitowych nośników tlenu pracujących w warunkach wysokotemperaturowych i wielokrotnych cykli redukcji i utleniania. Stwierdzono, że domieszkowanie tytanem stanowi skuteczną metodę poprawy stabilności perowskitowych nośników tlenu. Istotną część badań stanowiło określenie granic modyfikacji składu chemicznego perowskitów. Autorzy wykazali, że nadmierna zawartość tytanu prowadzi do obniżenia zdolności transportu tlenu, co wskazuje na konieczność kompromisu pomiędzy stabilnością strukturalną a aktywnością redoks. Tego typu analiza świadczy o krytycznym podejściu do uzyskiwanych wyników i podkreśla aplikacyjny charakter prowadzonych badań.

W rozdziale 7 Doktorant dokonał podsumowania oraz omówienia wyników uzyskanych w ramach wszystkich trzech artykułów składających się na rozprawę doktorską. Rozdział ten jest syntezą najważniejszych wyników dotyczących wpływu modyfikacji składu chemicznego spinelowych i perowskitowych stałych nośników tlenu na ich właściwości fizykochemiczne oraz na proces spalania.

Rozdział 8 stanowi obszerny wykaz literatury (149 pozycji). Bibliografia obejmuje pozycje z zakresu technologii spalania w chemicznej pętli tlenkowej, inżynierii: chemicznej, środowiska i materiałowej, stałych nośników tlenu o strukturze spinelu i perowskitu.

W ostatnim rozdziale Doktorant przedstawił swój dorobek naukowy, obejmujący wszystkie publikacje, udział w konferencjach naukowych, nagrody i wyróżnienia, udział w realizacji projektów badawczych oraz wyjazdy naukowe i szkolenia. Zaprezentowany dorobek potwierdza aktywność naukową Doktoranta oraz jego zaangażowanie w prowadzenie badań w obszarze inżynierii chemicznej. Należy podkreślić, że Doktorant uczestniczył w wielu konferencjach o zasięgu międzynarodowym, co sprzyjało nawiązywaniu współpracy z ośrodkami zagranicznymi oraz wymianie doświadczeń naukowych.

#### 4. Ocena rozprawy

Rozprawę doktorską mgr inż. Rafała Łysowskiego pt.: „Związki o strukturze typu perowskitu i spinelu zawierające w składzie żelazo i miedź do zastosowań w procesach CLC i CLOU” oceniam pozytywnie. Stanowi ona istotny wkład w rozwój wiedzy naukowej w obszarze nowoczesnych metod spalania paliw i metod spalania paliw, inżynierii chemicznej, środowiska i materiałowej stałych nośników tlenu stosowanych w technologiach spalania w chemicznej pętli tlenkowej. Podjęta tematyka ma znaczenie zarówno poznawcze, jak i aplikacyjne, a zakres prowadzonych badań jest zgodny z aktualnymi kierunkami badań naukowych. Doktorant wykazał się umiejętnością analizy literatury, poprawnym zidentyfikowaniem luk badawczych oraz właściwym doбором materiałów do badań. Przedstawiony cykl trzech publikacji naukowych tworzy spójną całość tematyczną.

Rozprawa dostarcza oryginalnych wyników naukowych, w szczególności w zakresie metod poprawy stabilności spinelowych i perowskitowych nośników tlenu poprzez domieszkowanie magnezem i tytanem. Wyniki te wnoszą istotny wkład do aktualnego stanu wiedzy i mogą stanowić podstawę do dalszych badań oraz potencjalnych zastosowań przemysłowych. Jednocześnie praca potwierdza samodzielność naukową Doktoranta. Doktorant udowodnił, że posiada wysokie kompetencje badawcze, a także zdolność samodzielnego prowadzenia i interpretowania uzyskanych wyników badań.

Za główne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- Opracowanie kompleksowej charakterystyki stałych nośników tlenu o strukturze spinelu i perowskitu, zawierających żelazo i miedź, przeznaczonych do zastosowań w procesach

spalania w chemicznej pętli tlenkowej (CLC) oraz chemicznej pętli z wydzieleniem tlenu (CLOU).

- Wykazanie, że domieszkowanie magnezem stanowi skuteczną strategię zwiększania stabilności fizykochemicznej i mechanicznej spinelowych nośników tlenu  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ , szczególnie w warunkach spalania biomasy oraz oddziaływania popiołów bogatych w metale alkaliczne.
- Potwierdzenie efektywności domieszkowania tytanem jako metody poprawy stabilności strukturalnej perowskitowych nośników tlenu na bazie  $\text{SrFeO}_3$ , przy jednoczesnym zachowaniu ich właściwości redoks istotnych dla procesów CLC i CLOU.
- Wniesienie oryginalnego wkładu do stanu wiedzy w zakresie projektowania trwałych stałych nośników tlenu do spalania paliw stałych, udokumentowanego publikacjami w renomowanych międzynarodowych czasopismach naukowych.

Podczas analizy rozprawy doktorskiej nasunęło mi się kilka spostrzeżeń i pytań, które mogą stanowić punkt wyjścia do dalszej dyskusji naukowej z mgr inż. Rafałem Łyskowskim. Oto najważniejsze z nich:

- 1) Opisując proces bezpośredniego spalania (CLC) w reaktorze paliwowym Doktorant w równaniu (1) zapisał wzór paliwa  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ , co to za paliwo, jeżeli wcześniej wspominał o węglu kamiennym i biomase, wzór wymaga korekty?
- 2) Zalecam ujednoczenie zapisu stopni utlenienia, ważne jest, aby odróżniać zapis stopnia utlenienia (np. +4) od zapisu ładunku jonu  $\text{Ti}^{4+}$  (np. 4+) gdzie znak występuje po liczbie.
- 3) Otrzymano szereg materiałów o strukturze spinelu o ogólnym wzorze  $(\text{Cu}_{1-x}\text{Mg}_x)\text{Fe}_2\text{O}_4$  oraz perowskitowe nośniki tlenu o wzorze ogólnym  $\text{Sr}(\text{Fe}_{1-x-y}\text{Cu}_x\text{Ti}_y)\text{O}_{3-\delta}$ , w jaki sposób /jaką metodą określono dokładny skład spineli i perowskitów, proszę o podanie metodyki oznaczenia?
- 4) W rozprawie często pojawia się pojęcie „właściwości fizykochemiczne stałych nośników tlenu”. Czy Doktorant mógłby wyjaśnić, co dokładnie rozumie pod tym pojęciem oraz wskazać, jakie podstawowe parametry fizyczne, chemiczne i strukturalne należy wyznaczyć, aby rzetelnie ocenić przydatność nośników tlenu do zastosowań w procesach CLC i CLOU?
- 5) Badania prowadzono głównie w zakresie dosyć wysokich temperatur tj. 900–1000 °C. Czy Doktorant rozważał możliwość efektywnej pracy badanych nośników w niższych temperaturach, szczególnie w przypadku biomasy czy innego materiału odpadowego? Niższa temperatura byłaby bardziej korzystna z punktu ekonomicznego jak również z punktu widzenia ograniczenia spiekania, żużlowania oraz zużycia materiałów konstrukcyjnych reaktora.
- 6) W pracy badano wpływ popiołu z biomasy odpadowej na degradację stałego nośnika tlenu. Czy istnieje graniczna zawartość popiołu w biomase, która ogranicza spalanie takiej biomasy w technologii CLC? Jakie składniki popiołu działają najbardziej niekorzystnie na trwałość stałego nośnika tlenu? Czy popiół nie mógłby pełnić roli stałego nośnika tlenu?
- 7) Doktorant stwierdza, że domieszkowanie Mg i Ti poprawia stabilność fizykochemiczną nośników tlenu, jednak może wpływać na ich reaktywność. Czy można określić, który z parametrów jest ważniejszy uwzględniając efektywność procesu spalania?
- 8) Czy zdaniem Doktoranta, istnieją naturalne minerały lub rudy metali, które mogłyby zostać bezpośrednio zastosowane jako stałe nośniki tlenu w technologii CLC/CLOU do spalania biomasy, bez konieczności ich zaawansowanego przygotowania lub modyfikacji chemicznej, a tym samym umożliwić istotne obniżenie kosztów całej technologii?

- 9) Czy Doktorant planuje kontynuację badań nad opracowanymi nośnikami tlenu w kierunku testów w większej skali laboratoryjnej lub półtechnicznej, np. w reaktorach ze złożem fluidalnym o pracy ciągłej, co pozwoliłoby na weryfikację ich zachowania w warunkach bardziej zbliżonych do rzeczywistych instalacji CLC/CLOU?
- 10) Uwaga edytorska: w pracy zauważalne są drobne niedociągnięcia redakcyjne i językowe, (np. literówki). Uchybienia te mają charakter wyłącznie redakcyjny i nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy ani na poprawność przedstawionych wyników, jednak ich korekta przyczyniłaby się do poprawy estetyki opracowania.

Podsumowując, przedstawiane powyżej uwagi, że mają charakter dyskusyjny, nie umniejszają wartości naukowej recenzowanej pracy i mam nadzieję, że będą punktem wyjścia do dyskusji podczas publicznej obrony oraz będą motywacją do przyszłych badań naukowych Doktoranta.

## 5. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Łysowskiego pt. „Związki o strukturze typu perowskitu i spinelu zawierające w składzie żelazo i miedź do zastosowań w procesach CLC i CLOU” stanowi odpowiedź na istotne wyzwanie naukowe i technologiczne związane z rozwojem nowoczesnych metod spalania paliw i odpadów, umożliwiających zwiększenie efektywności procesowej oraz ograniczenie emisji ditlenku węgla. Tematyka pracy wpisuje się w aktualne kierunki badań w obszarze inżynierii chemicznej koncentrując się na projektowaniu trwałych stałych nośników tlenu do zastosowań w technologiach spalania w chemicznej pętli tlenkowej (CLC) oraz chemicznej pętli z wydzielaniem tlenu (CLOU).

Doktorant wykazał się dojrzałością naukową oraz wysokim poziomem kompetencji badawczych, formułując jasno cel pracy i konsekwentnie go realizując. Zastosowanie nowoczesnych metod analitycznych (TGA, FTIR, GC-MS, SEM-EDS) oraz opracowanie wyników badań potwierdza, że Doktorant posiada wiedzę z zakresu inżynierii chemicznej, inżynierii środowiska i materiałowej oraz energetyki, a także bardzo dobre przygotowanie praktyczne w zakresie syntezy materiałów i prowadzenia zaawansowanych badań eksperymentalnych.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Łysowskiego obejmująca artykuły opublikowane w renomowanych międzynarodowych czasopismach naukowych (tj. *Waste Management* oraz *Journal of Environmental Management*) jest wartościowym, oryginalnym opracowaniem naukowym, które wnosi istotny wkład w rozwój technologii CLC i CLOU oraz inżynierii chemicznej stałych nośników tlenu. Jestem przekonana, że recenzowana rozprawa spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. **W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Chemiczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie mgr inż. Rafała Łysowskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.**

