



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Katedra Techniki Ciepłej i Ochrony Środowiska

Dr hab. inż. Małgorzata Wilk, prof. AGH

Al. Mickiewicza 30, bud. B4, p. 4A; 30-059 Kraków

Tel.: +48 12 617 46 09; e-mail: mwilk@agh.edu.pl

Kraków, 26 listopad 2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Hamed Ghiasirad

pt: „Optimization of polygeneration systems using hydrogen as an energy carrier”

pod opieką promotora prof. dr hab. inż. Anny Skorek-Osikowskiej

1. Podstawa opracowania

Podstawę formalną wykonania recenzji jest pismo RIE-BD.512.37.2025 z dnia 03.10.2025 od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej prof. dr hab. Krzysztofa Labusa z prośbą o ocenę rozprawy mgr inż. Hameda Ghiasirada oraz umowa o dzieło UMC/3172/2025 na wykonanie recenzji (stopień doktora) do wniosku numer 2986/UMC/RIE0-1/2025, zawarta pomiędzy Politechniką Śląską a Recenzentem, dotycząca spełnienia przez ww. rozprawę warunków określonych w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

2. Przedstawienie informacji o ocenianej rozprawie doktorskiej

Tytuł rozprawy “Optimization of polygeneration systems using hydrogen as an energy carrier”, w języku polskim “*Optymalizacja systemów poligeneracyjnych wykorzystujących wodór jako nośnik energii*”, trafnie podsumowuje podjętą w dysertacji tematykę badawczą skoncentrowaną na usprawnianiu, tak pod kątem ekonomicznym jak i środowiskowym technologii, w których powstający wodór w stałotlenkowym elektrolizerze może być z powodzeniem wykorzystany do produkcji biopaliw ciekłych takich jak biometanol, amoniak czy paliwo lotnicze. Udoskonalenia te wsparte są modelowaniem termodynamicznym, analizą techno-ekonomiczną oraz oceną cyklu życia od „kołyski po grób” ośmiu konfiguracji systemów energetycznych, z wykorzystaniem wodoru jako nośnika energii, wspierających implementację energii odnawialnej oraz ograniczającej ryzyko wynikające ze zmiennych cen energii elektrycznej. Uważam, że temat jest prawidłowo sformułowany, a podjęta tematyka jest odpowiedzią na potrzeby Unii Europejskiej dążącej do dekarbonizacji paliw przy równoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa energetycznego i wpisuje się w dyscyplinę *Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Praca doktorska jest zredagowana poprawnym językiem technicznym w języku angielskim i obejmuje 135 stron. Dysertacja składa się kolejno ze streszczeń i słów kluczowych w języku

angielskim i polskim, spisu treści, nomenklatury zawierającej wyjaśnienia zastosowanych skrótów oraz jedenastu głównych rozdziałów obejmujących kolejno: wprowadzenie z aktualnym stanem wiedzy, motywację z zakresem i hipotezami pracy, część opisującą podsystemy wykorzystujące produkowany wodór, oraz prezentację pięciu modelowanych układów poligeneracyjnych, z ośmioma konfiguracjami, z wynikami analiz termodynamicznych, techniczno-ekonomicznych i środowiskowych, porównanie wyników i podsumowanie. Na końcu pracy znajduje się dodatek oraz poprawnie oznaczony spis literatury obejmujący 206 pozycji. 91% pozycji bibliografii to artykuły naukowe w 85% opublikowane w ostatnich 10 latach, a to podkreśla, że Doktorant posiada bardzo dobrą znajomość bieżącego dorobku w tematyce dysertacji. Dodatkowo należy podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem 10 oraz współautorem 2 z cytowanych pozycji.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawia aktualną politykę energetyczną oraz stan obecnych technologii wspierających wytwarzanie wodoru w oparciu o odnawialne źródła energii w kontekście osiągnięcia zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych przynajmniej o 55% do 2030 oraz dążenia do neutralności klimatycznej Unii Europejskiej do 2050. Doktorant przybliży m.in. przemianę biomasy w biopaliwo za pomocą fermentacji beztlenowej czy zgazowania, wytwarzanie wodoru, ze wskazaniem elektrolizy zasilanej odnawialną energią jako „dojrzałej” technologii, czy problemy z jego składowaniem oraz zastosowaniem w różnych konfiguracjach przemysłowych, a przede wszystkim do produkcji paliw ciekłych takich jak biometanol, amoniak i biopaliwo odrzutowe, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu różnych systemów na wydajność, wyrównane koszty i wpływy na cykl życia.

Rozdział drugi przedstawia motywację, zakres i hipotezy postawione w pracy. Główną motywacją Doktoranta było przedstawienie w skali przemysłowej systemów energetycznych, wykorzystujących wodór, wytworzony w oparciu o energię odnawialną, do produkcji ciekłych biopaliw tj. biometanolu, amoniaku i biopaliwa odrzutowego, i wykazanie, że integracja tych systemów pozwala na zwiększenie efektywności, obniżenie kosztów i uniknięcie negatywnego wpływu na środowisko poprzez optymalizację projektowania z wykorzystaniem wodoru, konwersji biomasy, zarządzania tlenem, syntezy paliwa i podsystemów. Zakres obejmuje zaprojektowanie pięciu układów poligeneracyjnych z ośmioma konfiguracjami i ich ocenę pod kątem termodynamicznym, techniczno-ekonomicznym i środowiskowym. Postawione prawidłowo hipotezy dążą do określenia, który wybór wykorzystania/zastosowania wodoru jest najbardziej korzystny pod kątem energetycznym, ekonomicznym oraz środowiskowym, dla określenia:

- zwiększenia efektywności energetycznej układu poprzez zastosowanie wysokotemperaturowej elektrolizy,
- usprawnienia wydajności układu poprzez połączenie odzysku ciepła z turbiny tlenowej wraz z odzyskiem chłodu LNG,
- zarządzania odzyskiem ciepła z powstawania tlenu pomiędzy podsystemami,
- zwiększenia wydajności układu poprzez integrację wariantów z magazynowaniem energii w sprężonym powietrzu i cieple,
- usprawnienie wskaźników techno-ekonomicznych przez współprodukcję biopaliw i gazu ziemnego,

- zmniejszenie śladu środowiskowego poprzez zasilanie układu poligeneracyjnego energią wiatrową zamiast polską siecią elektryczną.

W rozdziale trzecim Doktorant prezentuje opis oraz równania termodynamiczne dla wszystkich zastosowanych podsystemów energetycznych w proponowanych układach poligeneracyjnych zamodelowanych w Aspen Plus, w oparciu o które wykonano optymalizację procesów i szczegółową ilościową analizę energetyczną. Są to następujące podsystemy: elektroliza wody dla alkalicznych i stałotlenkowych elektrolizerów, fermentacja beztlenowa do produkcji biogazu, oczyszczanie biogazu poprzez wypłukiwanie wodą CO_2 , zgazowanie biomasy parą wodną i tlenem, synteza amoniaku, synteza metanolu, produkcja energii elektrycznej i gazu ziemnego z odzyskiem chłodu z LNG i turbiną tlenową oraz konwersją tlenku węgla z parą wodną, kriogeniczna separacja powietrza na azot i tlen, magazynowanie energii w sprężonym powietrzu i ciepłe i ich odzysk, produkcja paliwa lotniczego wykorzystująca 4 etapy tj. reaktory odwrotnej przemiany wodno-gazowej i Fischer-Tropscha, wieżę destylacyjną i hydrokraking. Szczegółowe dane i założenia do obliczeń są zebrane w dodatku znajdującym się na końcu pracy.

Rozdział czwarty jest wprowadzeniem do założeń zastosowanych analiz: techno-ekonomicznej oraz środowiskowej. Analiza techno-ekonomicznej została przygotowana do oceny ośmiu konfiguracji pod kątem czasu zwrotu inwestycji i wyrównanego kosztu paliwa w celu określenia, który z zaproponowanych modeli jest najbardziej opłacalny i realistyczny do implementacji z ekonomicznego punktu widzenia. Inwentarz cyklu życia został opracowany w oparciu o dane pochodzące z wiarygodnych zacytowanych źródeł, symulacji wykonanych w Aspen Plus oraz danych z bazy Ecoinvent 3.11. Analiza środowiskowa od „kołyski po grób” wykonana została zgodnie ze znormalizowaną procedurą w SimaPro ze szczególnym naciskiem na uzyskanie wpływów zerowej emisji gazów cieplarnianych, zmiany klimatu oraz potencjału tworzenia efektu cieplarnianego biorąc pod uwagę 25 lat pracy układów na terenie Polski opartym o zasilanie energią elektryczną pochodzącą z energetyki wiatrowej oraz polskiej sieci energetycznej. Analizę cyklu życia przeprowadzono biorąc pod uwagę dwa różne podejścia, a mianowicie atrybucyjne i konsekwencyjne, które pozwalają na inne spojrzenie na wykonane analizy. Atrybucyjna analiza ocenia układy poligeneracyjne pod kątem inżynierskim z identyfikacją najistotniejszych środowiskowych problemów, doбором materiałów i stopniowym usprawnieniem badanych układów. Natomiast konsekwencyjna analiza cyklu życia jest bardziej skoncentrowana na ocenie podejmowanych decyzji, odpowiedzi rynku i polityki na proponowane modele, więc ma raczej strategiczne podejście do proponowanych zmian w dłuższym okresie użytkowania. Oba podejścia uzupełniają się i pozwalają na wykonanie pełniejszej oceny środowiskowej proponowanych układów.

Kolejne 5 rozdziałów to przedstawienie każdego z pięciu układów poligeneracyjnych z ośmioma proponowanymi konfiguracjami, ich ocena termodynamiczna, techno-ekonomiczna i środowiskowa, czyli atrybucyjna i konsekwencyjna analiza cyklu życia, oraz podsumowanie przeprowadzonych analiz. Analizowane układy poligeneracyjne, wykorzystujące zielony wodór jako nośnik energii, z ponumerowanymi ośmioma konfiguracjami to: produkcja metanolu z biogazu, w tym rozpatrywane są dwa warianty: 1) układ bazowy, czyli integracja fermentacji beztlenowej i biogenego CO_2 z zielonym H_2 powstającym w tlenkowym elektrolizerze zasilanym energią wiatrową lub z polskiej sieci elektrycznej, oraz 2) usprawniony o odzysk ciepła i chłodu z regazyfikacji gazu ziemnego i turbiny tlenowej; 3) produkcja metanolu z syngazu, powstałego ze

zgazowanej biomasy parą i tlenem z elektrolizera, oraz wodoru z elektrolizera, wraz z produkcją gazu ziemnego; 4) produkcja metanolu ze zgazowanej biomasy z uwzględnieniem odzysku ciepła odpadowego z systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu i produkcją paliwa; produkcja amoniaku oparta na tzw. trzech zielonych ścieżkach produkcji, czyli 5) z zastosowaniem separatora powietrza i alkalicznego elektrolizera zasilanych energią z paneli fotowoltaicznych, 6) z zastosowaniem zgazowania biomasy parą wodną i tlenem z separatora powietrza zasilanych energią z paneli fotowoltaicznych oraz współprądowego układu membranowego reaktora przemiany wodno-gazowej do produkcji wodoru i wyłapywaniu ciekłego CO₂, 7) z zastosowaniem zgazowania biomasy parą wodną i tlenem z separatora powietrza zasilanych energią z paneli fotowoltaicznych oraz przeciwprądowego układu membranowego reaktora przemiany wodno-gazowej do produkcji wodoru i wyłapywaniu ciekłego CO₂; 8) produkcja zrównoważonego paliwa lotniczego z syngazu, powstałego ze zgazowanej biomasy tlenem z elektrolizera, przetworzonego na lekkie węglowodory syntezą Fischera-Tropscha oraz gazu ziemnego połączonego z odzyskiem ciepła z turbiny tlenowej.

Rozdział 10 zawiera porównanie wyników z ośmiu różnych konfiguracji, na podstawie których Doktorant wybrał najbardziej obiecujące konfiguracje integrujące zastosowanie zielonego wodoru, tlenu, ciepła i energii elektrycznej wraz z magazynowaniem i odzyskiem ciepła do produkcji biopaliw ciekłych. I tak dla produkcji biometanolu najbardziej obiecującym wariantem jest konfiguracja 4, wykorzystująca zgazowaną biomasę z uwzględnieniem odzysku ciepła odpadowego z systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu i produkcją paliwa, ze względu na osiągnięcie najwyższej sprawności 95,27%, najwyższej wydajności paliwa na poziomie 8062 kg/h z równocześnie najniższymi wskaźnikami obciążenia środowiska oraz jedną z najniższych cen. Dla produkcji amoniaku najlepszym rozwiązaniem jest konfiguracja 7, z zastosowaniem zgazowania biomasy parą wodną i tlenem z separatora powietrza zasilanych energią z paneli fotowoltaicznych oraz przeciwprądowego układu membranowego reaktora przemiany wodno-gazowej do produkcji wodoru i wyłapywaniu ciekłego CO₂, ze względu na najwyższą efektywność energetyczną 54,64%, najniższy wskaźnik wyrównanego kosztu paliwa (513,28 \$/tonę) i najniższymi wskaźnikami obciążenia środowiska. Dla produkcji paliwa odrzutowego, konfiguracja 8, produkcja zrównoważonego paliwa lotniczego z syngazu, powstałego ze zgazowanej biomasy tlenem z elektrolizera, przetworzonego na lekkie węglowodory syntezą Fischera-Tropscha oraz gazu ziemnego połączonego z odzyskiem ciepła z turbiny tlenowej, była najlepszym rozwiązaniem.

Pracę kończy podsumowanie, w którym Doktorat wyszczególnia 20 wniosków z wykonanej pracy, potwierdzając, że integracja różnych systemów zasilanych energią odnawialną w połączeniu z wykorzystaniem elektrolizera oraz sprzężeniem cieplno-elektrycznym podnosi sprawność konwersji, obniża wyrównany koszt paliwa i redukuje oddziaływania środowiskowe oraz pozwala na efektywne wytworzenie paliw ciekłych. Moim zdaniem, w tej części zabrakło stwierdzenia, w którym Doktorant potwierdza, że udowodnił postawione hipotezy w pracy.

Stwierdzam, że tytuł odzwierciedla zakres pracy, postawione hipotezy są zrozumiałe, a wykonane obliczenia i analizy dążą do potwierdzenia postawionych hipotez. Ponadto, na uwagę zasługuje kompleksowość wykonanych analiz.

3. Ocena rozprawy

Uważam, że tematyka pracy jest bardzo interesująca i oryginalna oraz wpisuje się w aktualne trendy badawcze, a zastosowanie uzyskanych wyników ma praktyczne zastosowanie w przemyśle energetycznym, który dąży do osiągnięcia dekarbonizacji paliw przy równoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa energetycznego. Dlatego uważam, że przedstawione wyniki analiz są bardzo istotne do rozwoju technologii wykorzystujących zielony wodór w Polsce, a jego integracja z innymi procesami optymalizowana pod kątem termodynamicznym i środowiskowym pozwoli na szybki rozwój i wdrażanie tych technologii.

Pracę czyta się bardzo dobrze, jest zredagowana poprawnie, a opracowane schematy technologiczne są starannie wykonane i szczegółowo opisane, co pozwala na płynne zapoznanie się z jej zawartością. Układ pracy w części badawczej jest niestandardowy, ze względu na jednoczesne zaprezentowanie omawianych konfiguracji układów poligeneracyjnych oraz wyników oceny termodynamicznej, techno-ekonomicznej i środowiskowej, z krótkim podsumowaniem.

Za główne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- krytyczną ocenę krajowego i światowego stanu wiedzy na temat możliwości zastosowania wodoru jako nośnika energii w układach poligeneracyjnych do produkcji paliw ciekłych ze szczególnym uwzględnieniem efektywności, kosztów i oceny środowiskowej,
- priorytetowe traktowanie energii odnawialnej biorąc pod uwagę ograniczenia wynikające z przepisów środowiskowych,
- opanowanie i wykorzystanie narzędzi analitycznych w celu możliwości wykonania oceny termodynamicznej, techno-ekonomicznej i środowiskowej, co świadczy o zdolności Doktoranta do prowadzenia badań analitycznych,
- opracowanie ośmiu modeli termodynamicznych dla rozpatrywanych konfiguracji układów poligeneracyjnych, co świadczy o głębokiej wiedzy merytorycznej Doktoranta,
- dobór rzetelnych danych wejściowych niezbędnych do wykonania obliczeń wspartych krytyczną analizą,
- wyznaczenie jednostki funkcjonalnej oraz zdefiniowanie warunków brzegowych do oceny środowiskowej zaproponowanych konfiguracji,
- określenie kluczowych wskaźników efektywności obejmujących całkowitą sprawność energetyczną, wyrównany koszt paliwa, potencjał tworzenia efektu cieplarnianego oraz wskaźnik wyczerpywania zasobów kopalnych,
- wykonanie szczegółowych analiz termodynamicznych, techno-ekonomicznych oraz środowiskowych dla ośmiu konfiguracji pięciu układów poligeneracyjnych wykorzystujących zielony wodór jako nośnik energii,
- oszacowanie ryzyka związanego ze zmiennością cen energii elektrycznej,
- kompleksowe podejście do optymalizacji zaproponowanych układów poligeneracyjnych.

Proszę o wyjaśnienie następujących zagadnień, które nasunęły mi się w trakcie czytania pracy:

1. Czy po wykonaniu zaproponowanych analiz zastosowania wodoru jako nośnika energii wraz z zintegrowanymi systemami energetycznymi widzi Pan możliwość potencjalnej

implementacji najbardziej korzystnego wariantu do produkcji paliw ciekłych w Polsce w najbliższej przyszłości?

2. Jakie były kryteria doboru procesu zgazowania biomasy? Czy rozważał Pan zgazowanie innych odpadów organicznych? lub zastosowanie innego procesu przetwarzania?
3. Czy przy planowaniu wykorzystania fermentacji beztlenowej brał Pan pod uwagę ewentualne problemy wynikające ze skomplikowanego charakteru pofermentu? Czy zastanawiał się Pan nad wprowadzeniem dodatkowego systemu uszlachetniającego poferment?
4. Czy planuje Pan udoskonalić układy wykorzystujące skroplony CO₂? Jeżeli tak to w jaki sposób?
5. Czy planuje Pan rozwój zaproponowanych układów? Jeżeli tak to w którym kierunku planuje Pan prowadzić integrację systemów?
6. Czy brał Pan pod uwagę zaproponowanie implementacji systemu CCUS?
7. W pracy znalazła się uwaga, że korzystał Pan z danych eksperymentalnych zebranych przez zespół prof. Barteli dotyczących odzysku odpadowego ciepła. Czy planuje Pan dla któregoś z zaproponowanych wariantów przeprowadzić badania eksperymentalne?

Podczas lektury pracy zauważyłam nieliczne błędy edytorskie i brak konsekwencji w stosowanych skrótach nazewnictwa, głównie w części wstępnej pracy, która jest mniej dopracowana niż część badawcza, m.in.:

1. Str. 9. Spis skrótów nie obejmuje wielu stosowanych oznaczeń w pracy, szczególnie z części wstępnej, co utrudniało początkowo czytanie pracy, np. AD, WGS, SAF, GWP, SOEC, FDP, LNG, CCUS, MSW, GHG, RNG, ETS, DS., AC, FT, ATR, PEM, TES, IRR, HEFA, ATJ, CEPC, UNIDO, TPC, AI, KIP i inne. Niektóre są wyjaśniane w tekście, a inne nie jak np. KIP.
2. Str. 16. Doktorant opisując elektrolizę stałotlenkową używa wymiennie oznaczeń SOEL i SOEC, czy one są tożsame?
3. Str. 18 w pkt 1.6. Doktorant używa określeń szary i zielony wodór, ale brak wyjaśnienia tych terminów.
4. Str. 23 Tabela 1.2, wiersz pierwszy, zastosowano skrót STC, którego nie uwzględniono przy opisie *solar thermal collector*.
5. Str. 34. Rys. 3.4 brak opisu P1 i P2 przytoczonych w tekście.
6. Str. 37. Błędne objaśnienia równań 3.21 i 3.22.
7. Str. 37. Czy zaprezentowany w Tabeli 3.2 skład syngazu jako stosowany do obliczeń w modelu wynika z obliczeń czy jest założony w pracy?
8. Str. 39. *Stream* 88 nie został zaznaczony na rys. 3.10.
9. Str. 40. Błąd edytorski w tekście: błędnie oznaczone równanie 10.
10. Str. 47. Czy LCOF to to samo co LCOP?
11. Str. 75. Brak wyjaśnienia skrótu NPV, który znajduje się na rys. 6.6.
12. Str. 129, 133. Brak pełnego opisu cytowanych prac nr 13 i 172.

Pragnę podkreślić, że powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny, w większości są to błędy edytorskie i nie umniejszają one wartości naukowej recenzowanej pracy Doktoranta, którą oceniam bardzo dobrze.

5. Podsumowanie

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

Oceniam pracę bardzo pozytywnie i stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Hameda Ghiasirada pt: „*Optimization of polygeneration systems using hydrogen as an energy carrier*” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Pan Hamed Ghiasirad wykazał się wysoką dojrzałością naukową formułując hipotezy, określając zakres pracy, wykonując obliczenia i ich analizę oraz poprawnie formułując wnioski końcowe potwierdzające postawione hipotezy. Uważam, że mgr inż. Hamed Ghiasirad wykazał, że posiada ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Podsumowując, zwracam się z prośbą do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Hameda Ghiasirada do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Wnioskuje również o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Hamed Ghiasirad ze względu na jej oryginalność, szeroki zakres i kompleksowe podejście do badań uwzględniające aspekty techniczne, ekonomiczne i środowiskowe oraz perspektywę rozwoju układów poligeneracyjnych wykorzystujących wodór, powstały w oparciu o odnawialne źródła energii, do produkcji ciekłych biopaliw i gazu ziemnego.

Podpisała Małgorzata Wilk