

Kraków, 19.05.2025

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Energetyki i Paliw
Al. A. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
wnowak@agh.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskie mgr inż. Kamili Szykowskiej
„Badanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru
wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z OZE”

Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z 24.04.2025 pismo RIE-BD.512.22.2025

Zasadność tematyki

Rozprawa doktorska poświęcona analizie wykorzystania wodoru z OZE do produkcji paliw alternatywnych (syntetycznego gazu ziemnego (SNG) oraz amoniaku) jest jak najbardziej zasadna z punktu widzenia aktualnych wyzwań cywilizacyjnych, politycznych i technologicznych. Praca dotyczy kluczowych zagadnień transformacji energetycznej, takich

jak dekarbonizacja, zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii, magazynowanie energii i produkcja paliw alternatywnych zgodnych z Europejskim Zielonym Ładem.

Obecny stan wiedzy oraz uwarunkowania polityczne i gospodarcze jednoznacznie wskazują, że rozwój gospodarki wodorowej jest jednym z filarów strategii UE i Polski w kontekście osiągnięcia neutralności klimatycznej. Technologie takie jak Power-to-Gas (P2G) i Power-to-Fuel (P2F) umożliwiają magazynowanie nadwyżek energii z OZE oraz dekarbonizację sektorów trudnych do elektryfikacji, takich jak przemysł ciężki i transport dalekobieżny. Zgodnie z literaturą i oficjalnymi strategiami (m.in. PSW i PEP2040), wodór i jego pochodne (amoniak, SNG) stają się kluczowymi nośnikami energii przyszłości.

Pomimo intensywnych badań nad elektrolizą, magazynowaniem wodoru czy technologią metanizacji i syntezy amoniaku, niewiele prac obejmuje kompleksową analizę całego łańcucha technologicznego – od produkcji wodoru z OZE po jego konwersję i ekonomiczne uzasadnienie produkcji paliw alternatywnych w ujęciu dynamicznie zmieniających się warunków energetycznych. Praca ta oferuje pełne podejście systemowe, uwzględniające sezonowość produkcji OZE, zmienność cen energii i CO₂, modelowanie technologiczne oraz analizę ekonomiczną.

Badania zawarte w rozprawie mają wysoką wartość aplikacyjną. Umożliwiają projektowanie hybrydowych instalacji energetycznych opartych na integracji farm OZE z elektrolizerami, reaktorami syntezy amoniaku/SNG i modułami odzysku ciepła (ORC, silniki Stirlinga). Takie rozwiązania mogą być wdrażane w regionach o rozwiniętej infrastrukturze OZE lub tam, gdzie konieczne jest lokalne magazynowanie energii. Wskazane przez doktorantkę kierunki optymalizacji technologicznej i kosztowej mogą przyczynić się do zwiększenia opłacalności inwestycji w technologię wodorową.

Cel pracy

1. Cel zasadniczy:

- Kompleksowa analiza możliwości energetycznego wykorzystania wodoru wyprodukowanego z nadmiarowej energii elektrycznej z OZE w produkcji paliw alternatywnych (SNG i amoniaku), w kontekście poprawy efektywności energetycznej i redukcji emisji CO₂.

2. Cele szczegółowe:

- Przeprowadzenie przeglądu literatury w zakresie produkcji wodoru, technologii P2F i magazynowania energii.
- Modelowanie zmienności dostępności energii z farm wiatrowych i PV oraz ocena ich potencjału dla zasilania elektrolizerów.
- Opracowanie modeli produkcji wodoru i jego dalszej konwersji w paliwa alternatywne przy użyciu Aspen Plus.
- Analiza wpływu parametrów procesowych (temperatura, ciśnienie) na wydajność syntezy SNG i amoniaku.
- Badanie możliwości odzysku energii cieplnej w systemach hybrydowych (ORC, Stirling).
- Przeprowadzenie analizy ekonomicznej i ocena opłacalności inwestycji w kontekście zmiennych cen wodoru, CO₂ i energii.

Praca doktorska wnosi istotny wkład zarówno w rozwój wiedzy naukowej w obszarze systemów Power-to-Fuel, jak i w praktykę inżynierską poprzez identyfikację opłacalnych i technologicznie wykonalnych ścieżek produkcji paliw alternatywnych z wykorzystaniem wodoru

Tytuł rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Szykowskiej : „Badanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z OZE” jest zgodny z treścią pracy. Tematyka rozprawy precyzyjnie odzwierciedla zakres przeprowadzonych badań oraz analiz, które koncentrują się

Zarówno cel pracy, jak i jej wyniki bezpośrednio korespondują z zakresem wskazanym w tytule.

Układ pracy

Praca została podzielona na sześć rozdziałów i liczy 128 stron. Bibliografia zawiera 130 pozycji. Rozprawa została starannie zaplanowana i logicznie uporządkowana, a kolejne rozdziały prowadzą czytelnika przez złożony i interdyscyplinarny obszar badawczy związany z wykorzystaniem wodoru produkowanego z odnawialnych źródeł energii. Pierwszy rozdział zawiera obszerny przegląd literatury, który stanowi solidne wprowadzenie do tematyki pracy. Autorka omawia aktualny stan wiedzy w zakresie rozwoju rynku OZE, możliwości produkcji wodoru, metod jego magazynowania oraz technologii syntezy paliw alternatywnych – w szczególności syntetycznego gazu ziemnego (SNG) i amoniaku. W rozdziale tym

przedstawiono również aspekty związane z wychwytem i wykorzystaniem CO₂ oraz przeanalizowano dostępne technologie magazynowania energii wodorowej w różnych formach, co daje czytelnikowi szerokie tło technologiczne i rynkowe dla dalszych analiz.

Drugi rozdział skupia się na analizie pracy źródeł odnawialnych, w szczególności farm wiatrowych i fotowoltaicznych, z uwzględnieniem sezonowej oraz godzinowej zmienności generacji energii. Autorka opracowuje metodologię oceny dostępności energii elektrycznej dla zasilania elektrolizerów i wskazuje na znaczenie tzw. dolin energetycznych. Zaprezentowane dane i obliczenia stanowią podstawę do oceny, w jakim stopniu nadmiarowa energia może być realnie wykorzystana do produkcji wodoru.

W kolejnym, trzecim rozdziale Autorka przedstawia szczegółowy opis procesu syntezy SNG, wykorzystując zaawansowane modelowanie komputerowe w środowisku Aspen Plus. Analizie poddano wpływ parametrów technologicznych, takich jak ciśnienie i temperatura na wydajność oraz sprawność całego układu. Zbadano także możliwość zwiększenia efektywności energetycznej systemu poprzez integrację z modułami ORC oraz silnikami Stirlinga, umożliwiającymi odzysk ciepła odpadowego. Przedstawione wyniki mają praktyczne znaczenie dla optymalizacji układów Power-to-Gas.

Czwarty rozdział poświęcony jest technologii produkcji amoniaku z wykorzystaniem wodoru generowanego z OZE. Podobnie jak w przypadku SNG, proces został szczegółowo zamodelowany, a wyniki symulacji pozwalają ocenić wpływ zmiennych parametrów na efektywność konwersji oraz potencjalne korzyści energetyczne. W rozdziale tym zaprezentowano także analizy dotyczące zastosowania odzysku ciepła, co zwiększa atrakcyjność rozważanych konfiguracji z punktu widzenia inżynierii procesowej.

W rozdziale piątym Autorka przedstawia szczegółową analizę ekonomiczną zaproponowanych rozwiązań technologicznych. Obliczenia oparto na metodzie NPV, z uwzględnieniem rzeczywistych danych dotyczących kosztów inwestycyjnych, eksploatacyjnych, cen energii oraz emisji CO₂. W rozdziale tym przeprowadzono również analizę wrażliwości, identyfikując czynniki mające największy wpływ na opłacalność produkcji paliw alternatywnych. Tego rodzaju podejście pozwala na realistyczną ocenę ekonomicznych możliwości wdrożenia systemów Power-to-Fuel.

Całość pracy kończy się rozdziałem zawierającym podsumowanie i wnioski końcowe, w których Autorka syntetyzuje uzyskane wyniki oraz wskazuje najbardziej efektywne konfiguracje technologiczne i ekonomiczne. Podkreślono także potencjalny wkład

zaprezentowanych rozwiązań w proces transformacji energetycznej i osiągnięcia celów klimatycznych.

Wartość merytoryczna pracy

Rozprawa mgr inż. Kamili Szykowskiej prezentuje wysoki poziom merytoryczny, zarówno pod względem naukowym, jak i inżynierskim. Autorka w sposób kompleksowy i rzetelny przeanalizowała wszystkie kluczowe elementy łańcucha technologicznego, prowadzącego od pozyskania energii ze źródeł odnawialnych, przez produkcję wodoru w procesie elektrolizy, aż po jego konwersję w paliwa alternatywne – syntetyczny gaz ziemny i amoniak. Praca zawiera liczne analizy energetyczne i techniczne, oparte na realistycznych danych wejściowych i uwarunkowaniach eksploatacyjnych.

Dużą wartość naukową mają przeprowadzone przez Autorkę symulacje procesów technologicznych w środowisku Aspen Plus, umożliwiające ocenę wpływu kluczowych parametrów na efektywność i sprawność instalacji. Istotnym aspektem merytorycznym pracy jest również uwzględnienie odzysku ciepła poprzez integrację z modułami ORC i silnikami Stirlinga, co pokazuje inżynierskie podejście do optymalizacji układu.

Na szczególną uwagę zasługuje także część ekonomiczna rozprawy, w której Autorka zrealizowała obszerną analizę opłacalności inwestycji, z uwzględnieniem kosztów energii, wodoru, emisji CO₂ oraz wrażliwości na zmiany cen. Przedstawione obliczenia są przejrzyste, oparte na aktualnych danych i prowadzą do jednoznacznych wniosków dotyczących efektywności proponowanych rozwiązań technologicznych. W pracy zachowano równowagę między rozważaniami teoretycznymi a ich zastosowaniem praktycznym, co podnosi jej wartość użytkową.

Oryginalność i nowatorstwo

Rozprawa wnosi istotny i oryginalny wkład do badań nad integracją technologii wodorowych z odnawialnymi źródłami energii w kontekście magazynowania energii oraz produkcji paliw syntetycznych. Nowatorstwo pracy przejawia się przede wszystkim w kompleksowym podejściu do analizy całego systemu Power-to-Fuel, obejmującym zarówno technologię syntezy SNG, jak i amoniaku, z równoczesnym uwzględnieniem ich potencjału do sezonowego magazynowania energii i dekarbonizacji sektorów gospodarki.

Unikalnym aspektem rozprawy jest jednocześnie uwzględnienie zmienności generacji OZE, dynamiki produkcji wodoru oraz wykorzystania nadwyżek energetycznych do produkcji paliw alternatywnych – co zostało poddane modelowaniu z uwzględnieniem strat energii, odzysku ciepła i zmiennych warunków procesowych. Takie zintegrowane podejście spotykane jest rzadko w literaturze i świadczy o dużym stopniu samodzielności oraz innowacyjności Autorki.

Zastosowanie narzędzi symulacyjnych w celu optymalizacji konfiguracji technologicznych i ich ekonomiczna ocena w kontekście zmiennych rynkowych dodatkowo podkreślają interdyscyplinarność oraz praktyczny wymiar pracy. Zaprezentowane w rozprawie podejścia i wyniki mogą stanowić punkt wyjścia dla projektów pilotażowych i przemysłowych wdrożeń w obszarze gospodarki wodorowej i paliw alternatywnych.

Poziom warsztatowy

Rozprawa doktorska, będąca przedmiotem recenzji, jest owocem intensywnych prac badawczych, wymagających znacznego wysiłku w aspekcie obliczeniowym. Autorka wykazuje się bardzo dobrym przygotowaniem do przeprowadzenia zaawansowanych symulacji, co jest wsparte solidną wiedzą teoretyczną oraz kompetencjami w zakresie samodzielnych badań naukowych.

Imponująca jest biegłość, z jaką Autorka stosuje metody badawcze i interpretuje uzyskane dane, świadcząca o głębokim zrozumieniu tematu i metodologii.

Piśmiennictwo zastosowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Kamili Szykowskiej zostało dobrane w sposób staranny i adekwatny do poruszanej tematyki.

Uwagi krytyczne

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.

1. Brak szczegółowego uzasadnienia wyboru SNG i amoniaku jako produktów końcowych – warto byłoby rozwinąć, dlaczego te właśnie związki zostały wybrane spośród wielu możliwych nośników energii opartych na wodorze.
2. Kwestia dostępności i czystości CO₂ do procesu metanizacji – nie do końca jasne jest, z jakich źródeł CO₂ miałby być pozyskiwany i czy zakłada się jego wychwyt w konkretnym sektorze przemysłu.
3. Zakres danych wejściowych do modelowania w Aspen Plus – niektóre założenia dotyczące parametrów technologicznych i sprawności procesów wymagają uściślenia lub uzasadnienia literaturowego.
4. Zmienność pracy OZE została opisana w ujęciu ogólnym; brakuje jednak symulacji dynamicznych lub scenariuszy długoterminowych (np. na przestrzeni kilku lat), które lepiej oddałyby rzeczywiste warunki pracy instalacji.
5. Brak analizy scenariusza zintegrowanego obejmującego równoległą produkcję zarówno SNG, jak i amoniaku – obecne podejście analizuje je rozdzielnie.
6. Ograniczone odniesienie do istniejących instalacji demonstracyjnych lub pilotowych – warto byłoby wskazać, czy podobne konfiguracje były już badane lub wdrażane w warunkach rzeczywistych.
7. W rozprawie założono wykorzystanie nadmiarowej energii elektrycznej z OZE do zasilania elektrolizerów. Proszę doprecyzować, czy oznacza to przyjęcie kosztu energii na poziomie zerowym, czy jedynie zredukowany koszt jednostkowy. W przypadku drugiej opcji – warto wskazać, jakie koszty zmienne i stałe zostały przyjęte i czy uwzględniono ograniczoną dostępność chwil energii „nadmiarowej”. Produkcja wodoru z „nadmiarowej energii z OZE” może prowadzić do niższych kosztów energii elektrycznej, ale nie do kosztów zerowych, chyba że zachodzą bardzo specyficzne warunki (np. elektrolizer połączony bezpośrednio z wyspą farmą PV, brak sieci, brak opłat przesyłowych itd.).
8. Koszty produkcji SNG i amoniaku są bezpośrednio zależne od kosztu zielonego wodoru, który stanowi podstawowy substrat w analizowanych procesach. W przeglądzie literatury oraz analizie ekonomicznej Autorka przytacza koszty produkcji wodoru w przeliczeniu na USD/kg, co jest typowe dla źródeł zagranicznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że odniesienie się wyłącznie do danych w USD może utrudniać ocenę ekonomicznej opłacalności tych technologii w krajowych warunkach rynkowych. Warto byłoby odnieść te wartości do realiów europejskich (np. ceny energii i CO₂ w EUR) lub przedstawić przeliczenie kluczowych wyników na walutę polską (PLN), aby lepiej odzwierciedlić

kontekst wdrożeniowy i umożliwić ich porównanie z krajowymi strategiami energetycznymi i gospodarczymi.

9. W analizie ekonomicznej nie uwzględniono ryzyka technologicznego i regulacyjnego – szczególnie istotne przy ocenie innowacyjnych rozwiązań, których rentowność zależy od polityki klimatycznej i subsydiów.
10. W analizach NPV nie uwzględniono potencjalnych przychodów z redukcji emisji CO₂ (np. w ramach systemu EU ETS), które mogłyby istotnie wpłynąć na wyniki.
11. Brakuje porównania technologii elektrolizy – choć w pracy przyjęto jedną metodę, uzasadnienie wyboru konkretnego rodzaju elektrolizera nie zostało szczegółowo przedstawione.
12. Nie do końca jasne jest, jak uwzględniono koszty infrastruktury magazynowania (np. zbiorników ciśnieniowych, instalacji kriogenicznych, kawern solnych) w analizie ekonomicznej.
13. Rola ogniw paliwowych została potraktowana marginalnie, mimo że są one potencjalnym sposobem odzyskiwania energii z wodoru i mogą wpłynąć na konfigurację systemu.
14. Brakuje odniesienia do aspektów środowiskowych innych niż emisje CO₂, np. zużycia wody, śladu materiałowego, emisyjności amoniaku w transporcie czy ryzyka wycieków.
15. Literatura zagraniczna dominuje, ale brakuje aktualnych polskich źródeł dotyczących krajowych projektów pilotażowych, strategii wodorowych i potencjału kawern solnych.
16. Zagadnienie utylizacji ciepła odpadowego potraktowane jest w sposób dość uproszczony – warto byłoby uwzględnić realistyczne ograniczenia techniczne związane z jego wykorzystaniem.
17. Brakuje dyskusji nad możliwościami integracji analizowanego systemu z krajową infrastrukturą energetyczną lub gazową, co ma kluczowe znaczenie dla jego zastosowania przemysłowego.
18. W Tabeli 1.3 rozprawy dokonano porównania trzech głównych typów elektrolizerów: alkalicznego (AEC), PEM oraz SOEC. Przedstawiono ich podstawowe parametry techniczne, w tym zakres temperatur pracy, ciśnienie robocze, sprawność, czystość uzyskiwanego wodoru oraz energochłonność. W toku dalszej analizy Autorka zdecydowała się na wykorzystanie elektrolizera alkalicznego, co wynika z sekcji rozdziału 5.2, w której podano założenia do analizy ekonomicznej (Tabela 5.2). Wyraźnie wskazano tam, że wszystkie kalkulacje przeprowadzono właśnie dla tego typu elektrolizera, co

zostało również odzwierciedlone w wykresach (np. Rys. 5.6–5.12) i równaniach obliczających LCOH₂. PEM stosuje się tam, gdzie najważniejsza jest elastyczność, szybki rozruch i wysoka czystość wodoru, zwłaszcza w systemach dynamicznie zasilanych z OZE. Może należało wybrać ten elektrolizer. Proszę o uzasadnienie tego wyboru oraz odniesienie się do ewentualnych kompromisów między elastycznością technologiczną, a kosztami inwestycyjnymi.

Pytania do Autorki

1. Proszę uzasadnić wybór SNG i amoniaku jako końcowych produktów konwersji wodoru – czy analizowano alternatywne ścieżki technologiczne?
2. W pracy nie doprecyzowano źródeł CO₂ do procesu metanizacji – proszę wskazać, z jakich sektorów przemysłu miałyby on pochodzić i w jakiej formie.
3. Czy przewidziano możliwość równoczesnej pracy instalacji produkującej oba paliwa? Jeśli nie, proszę uzasadnić rozdzielenie analiz.
4. Proszę odnieść się do źródeł danych wejściowych w modelach procesowych (ciśnienie, temperatura, konwersja) oraz ich wpływu na wyniki.
5. W analizie ekonomicznej warto uwzględnić przychody z redukcji emisji CO₂ – czy ich nieuwzględnienie nie zaniża rentowności projektów?
6. Proszę wskazać, jakie kryteria zdecydowały o wyborze konkretnego typu elektrolizera – brak w pracy porównania technologii.
7. Czy w analizie NPV uwzględniono pełne koszty infrastruktury magazynowej wodoru i paliw? Jeśli nie – jaki może być ich wpływ na wyniki?
8. Jakie są ograniczenia techniczne związane z wykorzystaniem ORC i silników Stirlinga w analizowanym układzie?
9. Czy przewidywana była integracja systemu z istniejącą infrastrukturą gazową lub elektroenergetyczną w Polsce?
10. Proszę uzupełnić informację o ewentualnych ryzykach środowiskowych, zwłaszcza przy produkcji i magazynowaniu amoniaku.

Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Szykowskiej stanowi bardzo wartościowe opracowanie naukowe i techniczne, dotyczące jednego z kluczowych obszarów transformacji

energetycznej – integracji odnawialnych źródeł energii z technologiami produkcji, magazynowania i wykorzystania wodoru. Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością literatury przedmiotu, umiejętnością samodzielnego prowadzenia analiz technicznych i ekonomicznych oraz wykorzystania zaawansowanych narzędzi symulacyjnych.

Tematyka pracy wpisuje się w aktualne wyzwania cywilizacyjne związane z dekarbonizacją sektora energetycznego, a jej oryginalność polega na kompleksowym ujęciu zagadnienia energetycznego wykorzystania wodoru do syntezy paliw alternatywnych – syntetycznego gazu ziemnego i amoniaku – przy uwzględnieniu niestabilności produkcji energii z OZE oraz możliwości optymalizacji sprawności układów z odzyskiem ciepła.

Rozprawa została napisana w sposób logiczny, spójny i staranny. Jej układ ułatwia czytelnikowi śledzenie toku rozumowania i przeprowadzonych analiz. Praca ma wyraźnie interdyscyplinarny charakter i wnosi istotny wkład zarówno do nauki, jak i praktyki inżynierskiej w obszarze energetyki odnawialnej, technologii wodorowych i paliw syntetycznych.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*, a Autorka prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w tej dziedzinie, co świadczy o jej znajomości podstawowych zagadnień i umożliwia rzetelne podejście do realizacji celów badawczych postawionych w pracy. Autorka wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, co jest istotnym elementem jej kompetencji badawczych w zakresie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Dzięki temu potrafi efektywnie realizować postawione cele badawcze oraz rozwijać własne umiejętności analityczne i metodologiczne.

Podsumowując przeprowadzoną recenzję rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że przedłożona rozprawa w pełni spełnia kryteria określone w obowiązującym prawie dotyczącym nadawania stopni i tytułów naukowych art. 190 ust.3 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn.zm.) Rozprawa ta odzwierciedla zarówno dogłębną wiedzę teoretyczną, jak i umiejętności badawcze kandydatki. W związku z powyższym, rekomenduję, aby Rada Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej przyjęła rozprawę doktorską inż. Kamili Szykowskiej i dopuściła ją do kolejnego etapu postępowania kwalifikacyjnego.

Podpisał Wojciech Nowak