

Prof. dr hab. inż. Maciej Chorowski
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Wrocław 28.07.2025

Maciej.Chorowski@pwr.edu.pl

Recenzja

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

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 24.04.2025. Recenzowana rozprawa ma formę opracowanego maszynopisu zawierającego 128 stron.

Wybór tematyki, sformułowanie celu rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy technologii wytwarzania wodoru z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz wykorzystania tego wodoru do produkcji syntetycznego gazu ziemnego (SNG) oraz amoniaku (NH_3). Tematyka pracy jest niezwykle aktualna w warunkach polskich, ze względu zbliżającą się do granicy wydolności systemu elektroenergetycznego liczbę niestabilnych źródeł OZE zainstalowanych, bądź planowanych do instalacji. Mając na uwadze inercję w procesach instalacji nowych źródeł OZE oraz katastrofalny wręcz stan infrastruktury przesyłowej w Polsce, praca dotyczy fundamentalnych dla polskiej elektroenergetyki problemów jakimi są metody magazynowania energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych.

Cele rozprawy zostały sformułowane w sposób bardzo ambitny. Autorka podjęła się przeanalizowania zarówno pojedynczych jak i połączonych źródeł OZE (farmy fotowoltaicznej oraz wiatrowej) pod względem możliwości wykorzystania generowanej przez nie energii w cyklu rocznym do zasilania generatorów syntetycznego gazu ziemnego (SNG) oraz amoniaku (NH_3). W pracy oceniono efektywności instalacji wytwarzających SNG oraz NH_3 w zależności od ich konfiguracji oraz stopnia wykorzystania ciepła odpadowego poprzez doposażenie tych instalacji w obiegi ORC lub silniki Stirlinga. Przeprowadzono analizę ekonomiczną kosztów wytwarzania wodoru z wykorzystaniem energii OZE w procesie elektrolizy i określono cenę wodoru oraz jej zależność od zarówno od kosztów inwestycyjnych jak i eksploatacyjnych.

Realizacja celów szczegółowych rozprawy pozwoliła na sformułowanie tezy twierdzącej, że połączenie produkcji wodoru z OZE oraz magazynowania tego wodoru w postaci SNG i NH_3 pozwoli na wzrost efektywności systemu elektroenergetycznego, poprzez rzeczywiste zwiększenie konsumpcji energii z OZE. Bliskie źródła OZE zwiększenie konsumpcji energii elektrycznej stanowi alternatywę dla odstawiania tych źródeł w okresie tzw. dolin energetycznych. Tematyka i zakres pracy zostały sformułowane w sposób pozwalający na wykorzystanie ich rezultatów przy podejmowaniu decyzji inwestycyjnych dotyczących finansowania i budowy instalacji typu *Power to Fuel*.

Wybór tematyki rozprawy jest ambitny, aktualny i leżący w obszarze dyscypliny Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Treść pracy

Rozprawa została podzielona na 6 rozdziałów poprzedzonych zestawieniem symboli, wprowadzeniem oraz omówieniem celu i zakresu pracy.

Pracę rozpoczyna wprowadzenie w tematykę wykorzystania wodoru jako magazynu energii elektrycznej, następnie zostaje sformułowany cel i zakres rozprawy. Rozdział 1 zawiera wielowątkowy przegląd literatury dotyczący rynku OZE, metod produkcji i magazynowania wodoru, ogniw paliwowych, wykorzystania wodoru do produkcji SNG i NH_3 . Przywołane w pracy pozycje literaturowe (łącznie 130 pozycji) obejmują zarówno artykuły w czasopiśmie, pozycje książkowe jak i raporty agencji rządowych, think-tanków i strony internetowe przedsiębiorstw. Świadczy to o dobrym rozeznaniu Autorki w poruszanej w pracy tematyce oraz o umiejętności korzystania z wszystkich dostępnych rodzajów informacji. Prezentacja danych dostępnych w literaturze ma charakter artykułu przeglądowego, z krytyczną oceną analizowanych rozwiązań literaturowych.

W rozdziale 2 przeanalizowano dyspozycyjność odnawialnych źródeł energii – farmy fotowoltaicznej oraz farmy wiatrowej, obu o zainstalowanych mocach nominalnych wynoszących 5 MWp. Analizy zostały przeprowadzone dla rocznego okresu pracy instalacji, zarówno traktowanych oddzielnie, jak i pracujących łącznie w układzie hybrydowym. Określono dyspozycyjność instalacji w funkcji generowanej energii elektrycznej. Praca zawiera ciekawą analizę dolin dziennych w rocznej perspektywie (godziny 10 – 14), kiedy energia pochodząca ze źródeł odnawialnych jest najslabiej zagospodarowywana, a źródła te są często odstawiane ze względu na nadmiar mocy pozostającej do dyspozycji dyspozytora.

W rozdziale 3 szczegółowo przedstawiono technologię produkcji syntetycznego gazu ziemnego SNG z wykorzystaniem wodoru pochodzącego z elektrolizy. Przeanalizowano wpływ parametrów wejściowych na wydajność instalacji. Zaproponowano wykorzystanie ciepła odpadowego w obiegach ORC i Stirlinga. Policzono wzrost wydajności instalacji poprzez zastosowanie tych rozwiązań procesowych.

Rozdział 4 zawiera analogiczne analizy jak przedstawione w rozdziale 3, ale przeprowadzone dla produkcji amoniaku. Przeprowadzono analizę wrażliwości sprawności procesu produkcji amoniaku na wartości parametrów wejściowych, przeanalizowano możliwość poprawy sprawności przez wykorzystanie ciepła odpadowego w układach ORC i Stirlinga.

Rozdział 5 zawiera analizę ekonomiczną analizowanych procesów jednostkowych – generowania energii elektrycznej z OZE, ekonomiki wodoru wytworzonego w procesie elektrolizy, wytworzenia syntetycznego gazu ziemnego oraz amoniaku. Analiza jest wieloparametryczna, wykorzystuje jako kryterium ekonomiczne NPV, i daje konkretne wyniki dotyczące kosztów wytwarzania energii z OZE, a następnie wodoru, SNG i amoniaku.

Pracę zamyka rozdział 6 będący podsumowaniem całości pracy, po którym następują spisy literatury, rysunków, tabel oraz streszczenie po polsku i po angielsku.

Uwagi o tematyce i treści rozprawy

W związku z przyjętymi, zarówno w dokumentach międzynarodowych jak i polskich, założeniami dotyczącymi możliwości wykorzystania wodoru w procesach transformacji energetycznej, tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. Za szczególnie cenne uważam połączenie analiz technicznych z analizą ekonomiczną, co pozwala na ocenę opłacalności wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy i następnie przekształcenia go do postaci SNG i amoniaku.

Istotną część pracy stanowi analiza pracy farm fotowoltaicznej oraz wiatrowej oparta o rzeczywiste dane zebrane w okresie pełnego roku. Roczny horyzont czasowy pozwala na przeanalizowanie rzeczywistych wydajności takich instalacji pracujących osobno lub w układzie hybrydowym. Uwzględnienie dolin dziennych umożliwia określenie całkowitej ilości wodoru, która może być wytworzona w okresie roku przy założeniu wykorzystania energii elektrycznej generowanej w czasie obniżonego popytu na energię.

W pracy zaproponowano ciągi technologiczne konwersji wodoru na syntetyczny gaz ziemny oraz amoniak. Przeprowadzono analizę czułości proponowanych technologii na wybrane parametry procesowe (ciśnienie i temperaturę wodoru), co pozwoliło na optymalizację procesów. Następnie zaproponowano w jaki sposób można wykorzystać odpadowe źródła ciepła z obu procesów w prawobieżnych obiegach ORC oraz Stirlinga. W pracy wykazano, że obie propozycje prowadzą do wyższych sprawności konwersji wodoru na SNG i NH_3 , przy czym pod względem termodynamicznym bardziej sprawnym okazał się obieg Stirlinga.

Analiza ekonomiczna uwzględnia wiele parametrów i pozwala na wstępne podjęcie decyzji co do opłacalności inwestycji w będące przedmiotem badań Autorki technologie *Power to Fuel*. W obu analizowanych przypadkach (konwersja H_2 do SNG lub NH_3) decydująca jest cena energii elektrycznej przekładająca się wprost na cenę wodoru. Pozostałe czynniki mające wpływ na koszt wytworzenia analizowanych paliw są drugorzędne. W ten sposób praca pośrednio wykazała, że bez transformacji energetyki gwarantującej stabilne dostawy energii w akceptowalnej cenie, nie będzie możliwe zastąpienie paliw kopalnych przez tzw. paliwa syntetyczne wyprodukowane na bazie energii elektrycznej oraz wodoru uzyskanego z wody w procesie elektrolizy.

Praca jest bardzo obszerna pod względem analizowanych procesów oraz użytych narzędzi. Prowadzi do wniosków końcowych o charakterze jakościowym oraz ilościowym podając dokładne wartości zarówno sprawności termodynamicznych analizowanych procesów jak i wyliczenia ekonomiczne. Podczas analizy przedstawionych wyników nasuwają się następujące pytania o charakterze ogólnym i bardziej szczegółowe uwagi krytyczne:

1. Przedstawiona na rysunku 1.5 światowa produkcja wodoru wskazuje na gwałtowny wzrost w latach 2025 – 2030. Przy jakich założeniach prognozowany jest taki wzrost? Obecnie obserwuje się raczej wyhamowanie projektów wodorowych i trudności w zaopatrzeniu w wodór zamówionych już flot autobusów wodorowych. Prośba o komentarz dotyczący prognoz rozwoju rynku wodorowego.

2. Podobnie stwierdzenie, że Polska Strategia Wodorowa ma doprowadzić do neutralności klimatycznej i utrzymania konkurencyjności polskiej gospodarki wydają się mało realne, a nawet wewnętrznie sprzeczne. Prośba o komentarz.
3. Autorka przeanalizowała energię elektryczną dostępną z farmy fotowoltaicznej, wiatrowej oraz ich hybrydy, która może być wykorzystana w elektrolizerach i instalacjach syntezy SNG oraz NH_3 , traktowanych jako magazyny energii pochodzącej z OZE. Analiza dostępności energii elektrycznej została wykonana dla rocznego okresu z uwzględnieniem dolin dziennych. Brak jest analizy dostępności energii elektrycznej w krótkich, np. kilkudniowych okresach czasu podczas których nie jest generowana energia z żadnego z tych źródeł OZE (lub jest generowana w znikomej ilości). Czy zapewnienie optymalnych parametrów elektrolizera oraz instalacji syntezy SNG oraz NH_3 nie wymaga zainstalowania magazynów energii elektrycznej? Jakich pojemności? Jak drogie?
4. W jaki sposób uwzględnienie „martwych” okresów działania analizowanych źródeł OZE wpłynie na koszt inwestycji oraz koszty wytworzenia wodoru?
5. W pracy brak jest analizy dynamiki proponowanych urządzeń i ciągów technologicznych. Czy można zakładać ich równoczesne odstawienia powodowane brakiem nadmiarowej energii elektrycznej? Czy niektóre urządzenia (np. elektrolizer) nie będą musiały pozostawać w „gorącej rezerwie”, co może istotnie wpłynąć na ekonomikę proponowanych rozwiązań? Jakiego pogorszenia wskaźników ekonomicznych można się spodziewać w takich przypadkach?
6. W pracy stwierdzono, że zastosowanie obiegów Stirlinga oraz ORC do odzysku ciepła z instalacji syntezy SNG oraz NH_3 „znacząco poprawiło sprawność tych systemów”. Z wyników obliczeń wynika, że poprawa ta jest rzędu kilku procent (np. 0,87 zamiast 0,80). Czy taka poprawa sprawności jest uzasadniona jeśli uwzględnione zostaną zwiększone koszty inwestycyjne? W Tabeli 5.3 „Założenia do analizy ekonomicznej paliw alternatywnych” nie są wydzielone koszty doposażenia instalacji w obiegi ORC i silniki Stirlinga. Jak dodatkowe koszty inwestycyjne wpłyną na opłacalność inwestycji i niezawodność pracy całych instalacji?
7. Praca zawiera pewne nieścisłości, np. na stronie 19 napisano „Powstały wodór musi zostać sprężony, aby mógł być zmagazynowany”. Nie jest to ściśle stwierdzenie, gdyż wodór w postaci skroplonej (charakteryzującej się najwyższą z obecnie stosowanych metod jego magazynowania gęstością energii) przechowywany jest pod ciśnieniem zbliżonym do atmosferycznego. Podobnie trudno jest sobie wyobrazić magazynowanie wodoru w podziemnych zbiornikach w postaci skroplonej lub stałej. W zbiornikach takich musiałyby panować temperatury niższe od 20 K, co jest niemożliwe do uzyskania w kavernach skalnych czy opuszczonych kopalniach.

Uwagi redakcyjne.

- Na stronie 12 stwierdzono, że w ciągu 8 lat w Polsce nastąpił wzrost mocy zainstalowanej w ogniach fotowoltaicznych o 145%, natomiast z rysunku 1.4 wynika, że chyba o 14 tys. %?
- Niektóre parametry np. gęstość wodoru w tabeli 1. podawane są bez wskazania na warunki, w których zostały określone, np. warunki normalne.

- W pracy występują powtórzenia treści, tak jakby rozprawa była składana z kilku artykułów/raportów zawierających podobne wprowadzenia. Np. na stronach 15. i 18. podano w zasadzie powtarzające się informacje dotyczące polskiej strategii wodorowej z 2020 roku. Podobnie wprowadzenie do obiegu ORC zostało zrobione dwukrotnie, w rozdziale dotyczącym SNG i następnie w rozdziale dotyczącym NH₃.
- Niektóre sformułowania nie są precyzyjne i stąd trudne do jednoznacznego zrozumienia. Np. stwierdzenie „instalacja taka osiąga maksymalną efektywność energetyczną równą 26,08% przy minimalnym natężeniu promieniowania słonecznego” nie wiadomo co oznacza, gdyż nie wiadomo co to jest „minimalne natężenie promieniowania słonecznego”?
- Podpisy pod niektórymi wykresami i oznaczenia na rysunkach (np. rys. 2.4, rys. 3.24) są bardzo małe i praktycznie nieczytelne.
- Niektóre sformułowania nie są intuicyjne, np. początkowa produkcja oznacza ilość liczbę godzin pracy instalacji z nominalną wydajnością w pierwszym roku użytkowania (tabela 5.1), co wynika z jednostek, ale nie zostało wyjaśnione.
- Niektóre zdania są urwane, np. tytuł rozdziału 5.2 – „produkcji wodoru z elektrolizy”?

Przedstawione uwagi dotyczące treści pracy oraz redakcyjne nie umniejszają jej wartości. Są w części polemiczne, mogą mieć znaczenie przy publikacji wyników pracy lub formułowaniu wniosków o charakterze ogólnym, niekoniecznie dla specjalistów w energetyce i technologiach wodorowych.

Wniosek końcowy

Uzyskane wyniki symulacji procesów technologicznych oraz analizy finansowe potwierdzają znaczenie problemów badanych przez mgr inż. Kamilę Szykowską. Mając na uwadze obecne problemy związane z transformacją energetyki i koniecznością zapewnienia ciągłych dostaw energii elektrycznej przy wyraźnym przesyceniu systemu elektroenergetycznego niestabilnymi źródłami OZE, kompleksowe, techniczno-ekonomiczne podejście Autorki zasługuje na uznanie. Za szczególnie wartościową część pracy uważam określenie sprawności termodynamicznych proponowanych rozwiązań *Power to Fuel* i poddanie ich analizie ekonomicznej. Uzyskane wyniki pozwalają na sformułowanie wstępnych rekomendacji dotyczących budowy analizowanych systemów w skali przemysłowej.

Autorka jest biegła w modelowaniu złożonych systemów energetycznych oraz poddawaniu ich analizom ekonomicznym. Recenzowana rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowne przepisy.

Wnioskuje o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kamili Szykowskiej „Badanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z OZE” przez Radę Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podpisał Maciej Chorowski