

Katowice, 20 czerwca 2025 r.

Prof. dr hab. inż. Adam Smoliński
Główny Instytut Górnictwa - PIB
Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice
asmolinski@gig.eu

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Kamili SZYKOWSKIEJ

pt. „Badanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z OZE”

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach, prof. dr hab. Krzysztofa Labusa z dnia 28 kwietnia 2025 roku. Promotorem rozprawy jest Prof. dr hab. inż. Janusz Kotowicz a promotorem pomocniczym dr inż. Mateusz Brzęczek.

1. Tematyka rozprawy doktorskiej i trafność jej wyboru

Ograniczenie skutków zmian klimatycznych stało się jednym z najistotniejszych wyzwań stojących przed współczesnym światem. W odpowiedzi na to wyzwanie Unia Europejska wdrożyła Europejski Zielony Ład, którego nadrzędnym celem jest osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku. Kluczowym aspektem tych działań jest zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, odpowiedzialnych za podnoszenie się średniej globalnej temperatury. Szczególne znaczenie w tym procesie przypisuje się transformacji sektora energetycznego,

ponieważ spalanie paliw kopalnych pozostaje jednym z głównych źródeł emisji dwutlenku węgla.

Dokumenty takie jak wspomniany już Europejski Zielony Ład, pakiet legislacyjny „Fit for 55”, czy Dyrektywy RED II i RED III wyznaczają ambitne cele w zakresie zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych. Najnowszą inicjatywą w tym zakresie jest Clean Industrial Deal, czyli kompleksowy plan wspierający przemysł w przechodzeniu na czyste technologie, przy jednoczesnym zachowaniu konkurencyjności europejskiej gospodarki. Wodór odgrywa w tych działaniach rolę strategiczną. Postrzegany jako paliwo przyszłości, stanowi kluczowy element transformacji energetycznej i przemysłowej. Unia Europejska precyzuje w kwestii wodoru, że wodór, który ma być siłą napędową transformacji energetycznej powinien być tzw. „zielonym wodorem”, tj. wytwarzanym w procesie elektrolizy z użyciem energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł, takich jak fotowoltaika, czy energetyka wiatrowa. Unia Europejska wskazuje mechanizmy wsparcia inwestycji w infrastrukturę wodorową jako jeden z filarów unijnej strategii dekarbonizacyjnej.

Wodór pełni również kluczową rolę w kwestii udziału niestabilnych źródeł odnawialnych w miksie energetycznym. Może być wykorzystywany jako efektywny magazyn energii, pozwalając na zagospodarowanie nadwyżek produkowanych w okresach wysokiej generacji z OZE i wykorzystanie ich w momentach zwiększonego zapotrzebowania. Takie podejście wspiera stabilność i elastyczność systemów energetycznych, stanowiąc fundament dla dalszej integracji odnawialnych źródeł energii w skali krajowej i europejskiej. Światowe badania nad wodorem koncentrują się na opracowaniu nowych, bardziej wydajnych metod produkcji z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, rozwoju efektywnych metod magazynowania i transportu wodoru, w tym magazynowania w formie SNG i amoniaku, oraz jego zastosowaniu w energetyce, przemyśle i transporcie. Wiele grup badawczych prowadzi badania w zakresie integracji wodoru z systemami OZE jako narzędzi magazynowania energii i bilansowania sieci elektroenergetycznych. Równolegle prowadzone są badania nad ekonomią, cyklem życia i wpływem na środowisko wspierające tym samym opracowywanie polityk i modeli biznesowych dla rozwoju szerokorozumianej gospodarki wodorowej.

W świetle tego należy zauważyć że podjęte przez Doktorantkę prace badawcze wpisują się w światowy nurt nad wykorzystaniem wodoru wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej pochodzącej z OZE do produkcji paliw alternatywnych takich jak

syntetyczny gaz ziemny oraz amoniak. Doktorantka podjęła się analizy całego procesu technologicznego obejmującego zarówno szczegółową analizę dostępności i charakterystyki energii z farm wiatrowych i fotowoltaicznych, poprzez produkcję wodoru na drodze elektrolizy, po syntezę paliw alternatywnych.

Trafność wyboru tematu potwierdza aktualność i praktyczne znaczenie podjętych w pracy zagadnień stanowiących kompleksowe opracowanie w ramach technologii Power-to-Fuel.

Podjęta problematyka wpisuje się w kierunki polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej oraz cele polityki klimatycznej zawarte w Zielonym Ładzie oraz Clean Industrial Deal.

Oryginalność podejścia badawczego, polegającego na zastosowaniu rozległych analiz teoretycznych, modeli symulacyjnych oraz analizy ekonomicznej stanowi istotny wkład w rozwój technologii wodorowych w Polsce, wskazując na możliwość integracji produkcji wodoru z OZE oraz zwiększenie efektywności energetycznej oraz optymalizację kosztów produkcji wodoru, co otwiera nowe możliwości dla przyszłych prac naukowych i wdrożeń przemysłowych.

Reasumując, uważam, że zaproponowany przez Doktorantkę temat i zakres pracy doktorskiej wpisują się bez wątpienia w obszar ważnych i aktualnych problemów z obszaru badań nad efektywnymi metodami otrzymywania zielonego wodoru i jego późniejszego magazynowania w formie paliw alternatywnych (SNG, amoniak). Podjęcie tematu należy uznać za w pełni uzasadnione.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska zawiera 128 stron, 6 rozdziałów, 76 rysunków, 32 tabel i 130 pozycji bibliograficznych, w większości w języku angielskim, obejmujących najważniejsze pozycje literatury przedmiotu z ostatnich lat.

Rozprawę doktorską podzielono na dwie części: część I obejmującą przegląd stanu wiedzy (rozdział 1) oraz część II dotyczącą badań własnych Doktorantki (rozdziały 2-5). Ostatnią część rozprawy stanowi zwięzłe podsumowanie oraz wnioski z badań stanowiących przedmiot pracy doktorskiej (rozdział 6).

Na wstępie pracy Doktorskiej Doktorantka przedstawiła krótkie jednostronicowe wprowadzenie, w którym wskazuje czytelnikowi rolę wodoru jako paliwa przyszłości, który postrzegany jest jako przyszłościowy magazyn energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Jednoznacznie wskazuje na proces elektrolizy, która ma być źródłem energii do procesu produkcji zielonego wodoru i jego wykorzystanie w sektorze energetycznym do magazynowania energii. Omawia również wyzwania związane z poszukiwaniem nowych i skutecznych metod magazynowania wodoru w formie paliw alternatywnych przy wykorzystaniu energii z OZE i definiuje cel pracy doktorskiej, którym jest zbadanie i przeanalizowanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z nadmiarowej energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii do produkcji paliw alternatywnych tj. syntetycznego gazu ziemnego oraz amoniaku. Podaje również tezę pracy, mówiącą że efektywne połączenie produkcji wodoru z OZE i jego magazynowania w formie SNG i amoniaku zwiększy efektywność energetyczną systemu i przyczyni się do znacznej redukcji emisji CO₂. Definiuje również 5 pytań badawczych dotyczących zarówno parametrów pracy reaktora, wpływających na uzysk SNG i amoniaku, jak i rozwiązań technologicznych poprawiających sprawność procesu, co docelowo ma doprowadzić do redukcji emisji CO₂. Doktorantka podejmuje się również w swoich badaniach wskazać, które czynniki ekonomiczne mają największy wpływ na koszty produkcji paliw alternatywnych oraz drogi minimalizacji tychże kosztów.

Część dotyczącą przeglądu stanu wiedzy (rozdział 2) rozpoczyna Doktorantka od analizy światowego rynku OZE. Przedstawia moc OZE zainstalowaną na świecie w latach 2015-2023 oraz rozwój OZE w Polsce. Dlaczego nie uwzględniono roku 2024, który jest szczególnie jeżeli chodzi o rynek OZE na świecie – odnotowano w nim rekordowe wzrosty zainstalowanych mocy (wzrost OZE o około 15,1%)?

W dalszej części przeglądu stanu wiedzy mgr inż. Szykowska przedstawia możliwości produkcji wodoru. Szczegółowo omawia kolory wodoru stosowane w celu określenia źródeł jego pochodzenia. Omawiając wodór zielony, Doktorantka słusznie wskazuje, że jest to rodzaj wodoru najbardziej pożądanego w EU, produkowanego na drodze elektrolizy wody z wykorzystaniem energii elektrycznej pochodzącej z OZE. Słusznie wskazuje wady tejże metody związane wysokim kosztem produkcji zielonego wodoru oraz wysoką energochłonnością procesu. Należy tu jednak wspomnieć o jeszcze jednym bardzo ważnym aspekcie. Mianowicie na wyprodukowane 1 kg wodoru potrzeba ponad 9,2 litra wody. Biorąc pod uwagę ograniczone zasoby wody w Europie, również ten aspekt należy wskazać jako

wadę tej metody produkcji wodoru. Ponadto omawiając kolory wodoru zabrakło wskazania, że istnieje również tzw. wodór biały, czyli wodór występujący naturalnie w skorupie ziemskiej. Proszę o dodatkowy komentarz na ten temat podczas publicznej obrony. Omawiając w Tabeli 1.2 metody produkcji wodoru koniecznym byłoby wskazanie emisyjności poszczególnych metod, tj. ile kg CO₂ jest emitowane przy produkcji 1 kg wodoru daną metodą.

Jednocześnie nieprawdziwym jest stwierdzenie na stronie 17, że elektroliza jest obecnie najpopularniejszą metodą produkcji wodoru. W dalszym ciągu dominujące są metody bazujące na paliwach kopalnych (reforming parowy gazu ziemnego, zgazowanie węgla). Polska jest trzecim co do wielkości producentem wodoru, jednak jest to wodór pochodzący w całości z reformingu parowego metanu, a więc wodór szary. Na str. 18 Doktorantka wskazuje, że do roku 2050 na świecie jedynie 25% całkowitej produkcji wodoru będzie pochodziło z elektrolizy.

W dalszych rozważaniach Doktorantka analizuje możliwości magazynowania wodoru z wykorzystaniem zbiorników ciśnieniowych oraz kriogenicznych. Wskazuje również na „alternatywę” dla magazynowania tj. konwersję wodoru na energię elektryczną przy pomocy ogniw paliwowych zgodnie z ideą Power-to-Gas-to-Power. Doktorantka wskazuje, że ogniwa paliwowe stanowią możliwość czasowego zmagazynowania wodoru, a następnie jego przekształcenie w energię elektryczną. Wskazuje to rozwiązanie jako metodę „czasowego zatrzymania energii z OZE, której produkcja jest niestabilna i wysoce zależna od warunków atmosferycznych”. Proszę o komentarz na temat sprawności takiego procesu tj. produkcji wodoru w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej np. z PV, a następnie produkcji energii elektrycznej z tego wodoru w ogniwie.

Omawiając możliwości magazynowania wodoru Doktorantka wskazuje, że oprócz magazynowania wodoru w zbiornikach, duże możliwości niesie jego magazynowanie w strukturach geologicznych. Stwierdza, że „magazynowanie wodoru w strukturach geologicznych uważane jest za rozwiązanie zapewniające lepsze wykorzystanie jego potencjału”. To wymaga dodatkowego komentarza podczas publicznej obrony. Ostatnią część przeglądu stanu wiedzy Doktorantka poświęciła analizie literatury naukowej różnych struktur energetycznych wykorzystania wodoru wytworzonego z nadmiarowej energii elektrycznej pochodzącej z OZE do produkcji paliw alternatywnych (SNG i amoniaku) wraz z analizą ekonomiczną tychże procesów.

Na koniec przedstawionego opisu stanu wiedzy zabrakło krótkiego, syntetycznego podsumowania części teoretycznej pracy, uzasadniającego cel prowadzenia podjętych badań i stanowiącego nawiązanie do kolejnej części rozprawy, przedstawiającej metodykę i część badawczą.

Badania własne mgr inż. Kamila Szykowska rozpoczyna od analizy pracy źródeł odnawialnych dla określenia potencjału wykorzystania energii elektrycznej do zasilania procesu elektrolizy (rozdział 2). W ramach pracy analizowano farmę wiatrową oraz farmę fotowoltaiczną, obie o mocy 5 MW. Doktorantka przedstawiła metodykę obliczeń oraz pełną charakterystykę rocznego cyklu pracy farmy wiatrowej oraz farmy fotowoltaicznej o mocy 5 MW każda. Przedstawiła również charakterystyki rocznego cyklu pracy połączonych źródeł odnawialnych o łącznej mocy 10MW. W dalszej części pracy Doktorantka określiła ilość energii przekazanej do generatorów wodoru, co stanowi kluczowy element analizy współpracy z OZE, determinując ilość wytworzonego wodoru co jest zależne od przyjętego poziomu mocy nominalnej instalacji magazynowania energii. W ramach przyjętej metodologii do oceny pracy instalacji magazynowania energii wykorzystano wskaźnik wykorzystania maksymalnego czasu pracy opisującego stosunek czasu rzeczywistego pracy instalacji magazynowania energii i czasu maksymalnego pracy instalacji elektrolizy, wskaźnik znamionowej mocy generatorów wodoru (tj. stosunek średniej mocy generatorów wodoru w trakcie pracy instalacji do ich mocy nominalnej), wskaźnik zmagazynowania energii elektrycznej (stosunek rocznej energii dostarczanej do instalacji generatorów wodoru do całkowitej energii wygenerowanej przez farmę wiatrową oraz fotowoltaiczną) oraz wskaźnik czasu pracy (stosunek czasu pracy z mocą nominalną do rzeczywistego czasu pracy instalacji magazynowania energii).

W rozdziale 3 Doktorantka przeprowadziła badania modelowe z wykorzystaniem oprogramowania Aspen Plus badanego układu metanizacji. W ramach przeprowadzonych symulacji Doktorantka przeprowadziła systematyczne badania dla różnych wartości temperatury i ciśnienia na wlocie do I stopnia reaktora metanizacji. W jaki sposób zostały dobrane wartości temperatury i ciśnienia do badań? Otrzymane wyniki modelowania odnośnie najwyższych wartości sprawności i uzysku zostały osiągnięte dla wysokich wartości ciśnienia i niskich wartości temperatury panujących w reaktorze metanizacji i są zgodne z literaturą przedmiotu. Szczególną uwagę należy zwrócić na modelowanie procesu produkcji SNG z zastosowaniem układu ORC. W swoich badaniach mgr inż. Szykowska analizuje między innymi możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie modułów

ORC (Organic rankine cycle) czyli produkcji energii elektrycznej z niskotemperaturowych źródeł ciepła. Na Rys. 3.13 przedstawiono układ produkcji SNG z miejscami zastosowania ORC. Z opisu wynika, że jako czynnik roboczy został wytypowany etanol. Zostało to jednak skomentowane tylko jednym zdaniem, że wybór ten jest podyktowany przeglądem literatury oraz doświadczeniami zespołu badawczego Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Bardzo proszę o dodatkowy komentarz w tej kwestii podczas publicznej obrony.

W ramach dalszych badań własnych Doktorantka skupiła się na produkcji amoniaku w oparciu o metodę Habera i Bosch'a w badanej w ramach pracy instalacji. Doktorantka wskazuje m.in. że do przeprowadzenia reakcji produkcji amoniaku stosowane są katalizatory. Krótko omawia typy stosowanych katalizatorów, jednak nie wskazuje, który z nich jest najlepszym do przeprowadzenia procesu. Z jednej strony jest to w pełni zrozumiałe, gdyż w swoich badaniach Doktorantka nie przeprowadza syntezy, a jedynie modeluje proces z wykorzystaniem oprogramowania Aspen Plus skupiając się na wpływie ciśnienia i temperatury, jednak dodatkowe informacje na temat wyboru katalizatora do procesu byłyby wskazane.

Podobnie jak w przypadku produkcji SNG tak i w przypadku amoniaku Doktorantka wskazuje na atrakcyjność wykorzystania modułów ORC w celu zwiększenia sprawności układu produkcji amoniaku w tym wypadku wskazując na szereg parametrów decydujących o dobrze odpowiedniego czynnika do danego układu. W dalszej części badań własnych przeprowadza również analizę możliwości zwiększenia sprawności układu produkcji amoniaku poprzez zastosowanie silnika Stirlinga, co pozwoliłoby na uzyskanie wyższych wartości sprawności niż w przypadku wykorzystania modułów ORC.

Ostatnią część badań własnych (przedstawioną w rozdziale 5) stanowi analiza ekonomiczna, która obejmuje analizę produkcji energii elektrycznej z OZE, produkcji wodoru w procesie elektrolizy oraz produkcji paliw alternatywnych (SNG i amoniak) w badanych w ramach pracy instalacjach. W przeprowadzonej analizie wrażliwości Doktorantka wykazała, że zmiany nakładów inwestycyjnych, kosztów wodoru oraz kosztów emisji CO₂ mają największy wpływ na opłacalność produkcji paliw alternatywnych, wskazując, że obniżenie kosztów technologii produkcji zielonego wodoru jest kluczowe dla konkurencyjności analizowanych technologii na rynku.

Część dotyczącą badań własnych kończy zwięzłe podsumowanie, w którym Doktorantka przedstawia wnioski z przeprowadzonych analiz różnych struktur energetycznego

wykorzystania wodoru wytworzonego z nadmiarowej energii elektrycznej pochodzącej z OZE do produkcji paliw alternatywnych takich jak SNG oraz amoniak. W ramach pracy Doktorantka wykazała, że efektywne połączenie produkcji wodoru z OZE i jego magazynowania w formie SNG i amoniaku zwiększy efektywność energetyczną systemu i przyczyni się do znacznej redukcji emisji dwutlenku węgla, potwierdzając tym samym postawioną w pracy tezę.

Czytając rozprawę doktorską zauważono niedociągnięcia o charakterze redakcyjnym. Wybrane z nich przedstawiono poniżej:

1. Nie uniknięto potknięć o charakterze edycyjnym (np. na str. 13 jest „...w 2015 do 15809,4 w 2023”, powinno być „...w roku 2015 do 15809,4 MW w roku 2023”; na str.19 jest „...powołaniem pięciu Dolin: Śląskiej, ...”, powinno być: „...powołaniem pięciu Dolin: Śląsko-Małopolskiej, ...”; na str. 23 jest „...przechowywaniem dużych ilości wodoru nad ziemią – w zbiornikach ciśnieniowych”, powinno być: „...przechowywaniem dużych ilości wodoru w zbiornikach ciśnieniowych na powierzchni”, na str. 28 jest „Przeprowadzone badania wprowadzają...”, powinno być: „Przeprowadzone badania wprowadzają...”; na str. 37 jest „Do oceny pracy instalacji magazynowania energii zdecydowano wykorzystać się wielkości bezwymiarowymi w postaci wskaźników.”, powinno być: „Do oceny pracy instalacji magazynowania energii zdecydowano wykorzystać wielkości bezwymiarowe w postaci wskaźników.”; na str. 39 jest „2. 3 dodatkowa metodologia doboru mocy generatora wodoru”, powinno być: „2.3 Dodatkowa metodologia doboru mocy generatora wodoru”; na str. 60 jest „...i jego entalpi ...”; powinno być „...i jego entalpii ...”; na str.63 jest „3. 4 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie poprzez zastosowanie silnika Sirlinga”, powinno być „3.4 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie silnika Sirlinga”; na str. 78 jest „4. 3 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie poprzez zastosowanie modułów ORC” powinno być: „4.3 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie modułów ORC”; na str. 79 w Tabeli 4.6 jest „Mpa”, powinno być: „MPa”; na str. 82 jest : „4.4 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie poprzez zastosowanie silnika Stirlinga”, powinno być: „4. 4 Możliwości zwiększenia sprawności układu poprzez zastosowanie silnika Stirlinga”; na str. 89 jest „5. 2 produkcji wodoru z elektrolizy”, powinno być: „5.2 Produkcji wodoru z elektrolizy”; na str. 102 jest „5. 3 produkcji paliw

alternatywnych w badanych instalacjach”, powinno być: „5.3 Produkcji paliw alternatywnych w badanych instalacjach”; na str. 104 jest zdanie niedokończone: „W przypadku amoniaku”; na str. 113 jest „pod redakcją ŚciąŜko....”, powinno być „pod redakcją ŚciąŜko...”; na str. 114 jest „[49] Bataillec., ...”, powinno być: „[49] Bataillec ...”; etc

2. Jednostki SI powinny być stosowane w całej pracy (np. jest „ton” powinno być „Mg”; temperatura podawana jest w °C powinna być w °K; etc). Często w pracy w jednej tabeli zastosowane są różne jednostki dla tej samej wielkości, np. Tabela 3.4 str. 57; Tabela 4.7 str. 80.

Wniosek końcowy

Jednoznacznie stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Szykowskiej stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorantka, na podstawie przeprowadzonych badań i analiz, udowodniła postawioną tezę, że efektywne połączenie produkcji wodoru z OZE i jego magazynowania w formie SNG i amoniaku zwiększy efektywność energetyczną systemu i przyczyni się do znacznej redukcji emisji CO₂ oraz zrealizowała postawiony w pracy cel badawczy. Mianowicie, przeprowadziła kompleksową analizę różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z nadmiarowej energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii do produkcji paliw alternatywnych takich jak syntetyczny gaz ziemny oraz amoniak.

Należy podkreślić, że uzyskane wyniki mają wysoką wartość naukową i poznawczą. Doktorantka wykazała się dobrą umiejętnością formułowania problemów naukowych, prowadzenia badań naukowych oraz dokonywania analiz wyników. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Kamili Szykowskiej pt. *„Badanie różnych struktur energetycznego wykorzystania wodoru wytworzonego z wykorzystaniem nadmiarowej energii elektrycznej z OZE”* w pełni odpowiada warunkom określonym w ustawie z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnoszę o dopuszczenie jej przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej do jej publicznej obrony.

Podpisał Adam Smoliński