

Warszawa, 01.04.2025 r.

Dr hab. inż. Łukasz Szablowski, prof. PW
Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 21/25, pok. 213, 00-665 Warszawa
tel. +48 22 234 15 44
e-mail: lukasz.szablowski@pw.edu.pl
identyfikator ORCID: 0000-0002-6646-2297

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Michała Brzuszkiewicza zatytułowanej:

„Analiza techniczno-ekonomiczna oraz optymalizacja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze”

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzja ta została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 20 lutego 2025 r. oraz pisma o sygnaturze RIE-BD.512.10.2025 z dnia 28 lutego 2025 r. podpisanego przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej prof. dr hab. Krzysztofa Labusa.

2. Zawartość pracy

Do recenzji przedstawiono rozprawę doktorską w formie monografii naukowej napisanej w języku polskim. Praca spisana została na 128 stronach w formacie A4. Praca składa się z 6 rozdziałów (w tym wstęp oraz rozdział „konkluzje i wnioski”). Rozprawa zawiera również dwa streszczenia: w języku angielskim i polskim. Na końcu pracy umieszczono bibliografię, spis rysunków, spis tabel oraz załączniki.

3. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy są wielokryterialne analizy dla koncepcji hybrydowego systemu magazynowania energii opartego o sprężony dwutlenek węgla oraz wodór.

Efektom doktoratu jest studium wykonalności przedstawionego w pracy systemu magazynowania energii. Zaprezentowane przez Doktoranta badania obejmowały analizę dostępności rynkowej niezbędnych urządzeń oraz ocenę możliwości adaptacji lub budowy zbiorników ciśnieniowych. Przeprowadzono również analizy ekonomiczne i termodynamiczne.

4. Zasadność podjęcia tematu

W obliczu unijnej strategii dążącej do zeroemisyjności oraz ryzyka związanego z importem paliw kopalnych spoza UE, konieczne jest wdrażanie coraz bardziej efektywnych technologii energetycznych oraz rozwój odnawialnych źródeł energii. Wśród perspektywicznych rozwiązań można wyróżnić m.in. ogniwa fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, ogniwa paliwowe, turbiny gazowe napędzane wodorem oraz inne nisko- i zeroemisyjne źródła energii.

Niestety duży udział źródeł odnawialnych, w miksie energetycznym wiąże się z wystąpieniem znaczących konsekwencji dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Spowodowane jest to tym, że większość dostępnej w Polsce energii odnawialnej pochodzi ze źródeł zależnych od pogody tj. ogniwa fotowoltaiczne oraz turbiny wiatrowe. Praca tych źródeł w praktyce nie jest niestety możliwa do zaplanowania.

W związku z powyższym konieczne jest zaproponowanie odpowiedniego systemu magazynowania energii w dużej skali. Obecnie na szeroką skalę wykorzystywane są jedynie dwie metody magazynowania energii: elektrownie szczytowo-pompowe oraz systemy oparte na sprężonym powietrzu (CAES – Compressed Air Energy Storage). Obie technologie wymagają określonych warunków geograficznych lub geologicznych, co znacznie ogranicza liczbę miejsc odpowiednich do ich wdrożenia.

Technologia zaproponowana przez Doktoranta częściowo rozwiązuje ten problem, ponieważ sprężony dwutlenek węgla (w zbiorniku wysokiego ciśnienia) przechowywany jest w stanie nadkrytycznym, co wielokrotnie zmniejsza wymaganą do magazynowania objętość.

Tematyka zaproponowana w omawianej rozprawie doktorskiej jest bardzo istotna z naukowego a także z inżynierskiego punktu widzenia, ponieważ dotyczy nowatorskiego sposobu przechowywania energii z wykorzystaniem dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym. Rozwiązania opracowane w ramach rozprawy przyczynią się do poszerzenia wiedzy w obszarze związanym z magazynowaniem energii w sprężonym dwutlenku węgla i wodorze. Rozważania zawarte w pracy mogą istotnie wpłynąć na zagadnienia związane ze stabilizacją pracy systemu elektroenergetycznego w obliczu rosnącego udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych.

5. Teza i zakres rozprawy

Celem naukowym pracy jest potwierdzenie lub obalenie następującej hipotezy badawczej:

„Technicznie możliwa i ekonomicznie uzasadniona jest rynkowa adaptacja hybrydowego i skalowalnego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz w wodorze z wykorzystaniem dla niskociśnieniowego dwutlenku węgla referencyjnej objętości szybu pokopalnianego.”

Celem przedstawionej rozprawy było przeprowadzenie analiz wielokryterialnych dla koncepcji systemu magazynowania energii opartego o następujące procesy:

- sprężanie oraz ekspansja dwutlenku węgla,
- elektroliza wody,
- synteza metanu z wykorzystaniem dwutlenku węgla i wodoru wytworzonego w procesie elektrolizy wody,
- wysokociśnieniowe spalanie metanu syntetycznego w tlenie w celu wytworzenia gorących spalin do napędu ekspandera.

Przedstawiony system hybrydowy łączy dwa odrębne podsystemy magazynowania energii. Pierwszy wykorzystuje dwutlenek węgla przechowywany w dwóch zbiornikach – wysokociśnieniowym (przechowywanie CO₂ w stanie nadkrytycznym) i niskociśnieniowym. Podczas ładowania CO₂ z niskociśnieniowego zbiornika jest sprężane i przenoszone do wysokociśnieniowego, przy czym wytworzone ciepło może być magazynowane lub rozpraszane. W fazie rozładowania CO₂ jest podgrzewane, a następnie ulega ekspansji w ekspanderze

napędzającym generator energii elektrycznej, po czym trafia z powrotem do zbiornika niskociśnieniowego.

Drugi podsystem bazuje na magazynowaniu energii poprzez elektrolizę wody i metanizację CO₂. Wytworzony syntetyczny gaz ziemny spala się w atmosferze CO₂ i tlenu – produktu elektrolizy. Spaliny napędzają ekspander, który zasila generator energii elektrycznej. Kluczowym założeniem hybrydyzacji jest integracja cieplna obu podsystemów, co poprawia efektywność termodynamiczną systemu.

Jak napisano wcześniej, praca składa się z 6 rozdziałów, które bardziej szczegółowo opisano poniżej.

W rozdziale pierwszym - (wstęp) doktorant opisał problemy związane z prawidłowym funkcjonowaniem krajowego systemu elektroenergetycznego w obliczu zmian w strukturze źródeł wytwórczych. Omówione zostały tam wyzwania związane z rosnącym udziałem odnawialnych źródeł energii i wynikająca za nich konieczność rozbudowy wielkoskalowych magazynów energii.

W rozdziale drugim (cel i zakres pracy) przedstawiona została hipoteza badawcza. Opisano tam również koncepcję zaprezentowanego w rozprawie hybrydowego układu do magazynowania energii.

Przegląd różnych technologii magazynowania energii przedstawiono w rozdziale trzecim. Wśród zaprezentowanych w tym rozdziale technologii można wyróżnić: systemy grawitacyjne, elektrownie szczytowo-pompowe, układy wykorzystujące sprężone powietrze (CAES), układy wykorzystujące ciekłe powietrze (LAES) do magazynowania energii, magazyny energii wykorzystujące sprężony dwutlenek węgla, magazyny energii oparte na wodorze oraz układy magazynujące energię w syntetycznym gazie ziemnym. Wszystkie te technologie magazynowania energii zostały porównane wg następujących kryteriów: sprawności, kosztów inwestycyjnych, pojemności magazynu, wpływu na środowisko, zalet i wad.

W rozdziale czwartym przedstawiono koncepcję dotyczącą omawianego systemu do magazynowania energii. Opisano podsystem magazynowania w sprężonym dwutlenku węgla, podsystem produkcji wodoru i tlenu, podsystem produkcji syntetycznego gazu ziemnego oraz podsystem produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem procesu tlenowego spalania syntetycznego gazu ziemnego. W rozdziale tym przeanalizowano też potencjalnych dostawców głównych komponentów rozważanego systemu. W rozdziale czwartym przeprowadzono także analizę termodynamiczną hybrydowego systemu do magazynowania energii dla trzech wariantów systemu. Każdy z wariantów uwzględniał dodatkowo dwa przypadki, dla dwóch czasów trwania fazy rozładowywania równych 2 (przypadek A) lub 4 godziny (przypadek B). Przedstawiono równania opisujące model matematyczny rozważanego układu oraz wyniki dla wszystkich wariantów i przypadków.

Analizę ekonomiczną dla wszystkich (założonych w poprzednim rozdziale) wariantów i przypadków przedstawiono w rozdziale piątym. Analizę opłacalności ekonomicznej opracowano wykorzystując dyskontowe mierniki efektywności tj. wartość bieżącą netto (NPV) oraz wewnętrzną stopę zwrotu (IRR). Przedstawiono także warunki, przy których inwestycja ta może być rentowna.

Z kolei w rozdziale szóstym doktorant podsumował osiągnięcia swojej pracy, jak również uzasadnił postawioną przez siebie hipotezę badawczą.

6. Ocena oryginalności rozprawy

W rozprawie będącej przedmiotem niniejszej recenzji przedstawiono model termodynamiczny oraz analizę techniczno-ekonomiczną wraz ze studium wykonalności dla hybrydowego układu magazynowania energii wykorzystującego magazynowanie energii w sprężonym dwutlenku węgla, układ do produkcji wodoru i tlenu oraz układ do produkcji syntetycznego gazu ziemnego.

Najbardziej nowatorskim i oryginalnym elementem przedstawionego układu jest podukład do magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym.

Rozwiązania przedstawione w rozprawie doktorskiej dotyczące innowacyjnego systemu izobarycznych zbiorników na dwutlenek węgla zostały objęte ochroną patentową a Doktorant jest jednym ze współautorów tego patentu.

Argumenty te świadczą jednoznacznie o oryginalności zagadnień przedstawionych w rozprawie doktorskiej będącej przedmiotem niniejszej recenzji.

7. Wartości użytkowe pracy

Do wartości użytkowych przedstawionej rozprawy doktorskiej można zaliczyć przeprowadzenie studium wykonalności systemu magazynowania energii, wykorzystującego sprężony dwutlenek węgla i wodór jako nośniki energii. Oceniono także możliwość realizacji zaprezentowanego hybrydowego systemu do magazynowania energii pod kątem dostępności rynkowej niezbędnych urządzeń oraz technicznej adaptacji lub budowy zbiorników ciśnieniowych. Dodatkowo przeprowadzono analizy termodynamiczne i ekonomiczne.

Rozważania te mogą przyczynić się do rozwoju nowoczesnych systemów wielkoskalowego magazynowania energii, które są w mniejszym stopniu uzależnione od warunków geologicznych niż elektrownie szczytowo-pompowe czy układy wykorzystujące sprężone powietrze. Spowodowane jest to tym, iż w przypadku dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym wymagana objętość magazynowania jest znacznie mniejsza niż dla sprężonego powietrza.

8. Uwagi krytyczne i pytania do pracy

Po przeczytaniu i przeanalizowaniu rozprawy można sformułować kilka uwag, komentarzy i pytań do pracy:

Uwagi:

- Doktorantowi zdarzyło się kilkakrotnie używać cytowań zagregowanych np. na stronie 7, 10, 19, 22, 23, 24, 25, 31, 32.

Komentarze:

- Dla lepszej czytelności wyników z rozdziału 4 dobrze by było zestawić/przedstawić wybrane (kluczowe) parametry dla różnych wariantów systemu na jednym wykresie. W ujęciu tabelarycznym (i to w osobnych tabelach) trudniej dla czytelnika jest porównywać poszczególne warianty systemu. Dobrze by było przedstawić kilka takich wykresów na obronie (np. tabela 4.28 w formie wykresu słupkowego).

Pytania:

- Na stronie 53 przedstawiono założenie, że reakcja metanizacji została zasymulowana „przy użyciu reaktora chemicznego, który zakłada równowagę wielofazową opartą na minimalizacji energii swobodnej Gibbsa”. Czy reaktor Gibbsa nie da zbyt optymistycznych wyników dla reakcji metanizacji?
- Czy magazynowanie ciepła wytworzonego w procesie sprężania CO₂ i wykorzystanie go w trakcie rozładowywania podukładu na dwutlenek węgla nie podniosłoby całkowitej sprawności systemu?
- Założenie na temat stałego ciśnienia magazynowania w przypadku zbiornika z dwutlenkiem węgla o niskim ciśnieniu było słuszne przy wykorzystaniu sztucznego zbiornika o konstrukcji objętej ochroną patentową (zgodnej z patentem, którego Doktorant jest współautorem). Z uwagi na wymaganą dużą pojemność magazynową tego zbiornika Doktorant zdecydował, że niskociśnieniowy zbiornik CO₂ powstanie w wyniku zaadaptowania nieczynnego szybu kopalni. W jaki sposób w zbiorniku niskociśnieniowym, będącym nieczynnym szybem kopalni, można utrzymać stałe ciśnienie magazynowania?
- Dodatkowo do powyższego założenia Doktorant przyjął, że ciśnienie w niskociśnieniowym magazynie CO₂ będzie równe 0,1 MPa (czyli 1 bar). Jest to ciśnienie bliskie atmosferycznemu. W jaki sposób możliwe będzie przetwarzanie dwutlenku węgla do i z nieczynnego szybu kopalni przy ciśnieniu, które jest bliskie atmosferycznemu (przy stałym ciśnieniu magazynowania)?

9. Uwagi redakcyjne

Pomimo tego, że rozprawa została spisana z dużą starannością możliwe jest wskazanie kilku uwag redakcyjnych:

- W pracy doktorantowi zdarza się używać języka potocznego.
- W pracy występują powtórzenia tych samych wyrazów w jednym zdaniu.
- Praca zawiera też pewną liczbę literówek. Nie mają one jednak znacznego wpływu na zrozumiałość i wartość merytoryczną pracy.

10. Ostateczna ocena pracy

Zaprezentowany układ rozprawy doktorskiej jest poprawny i typowy dla tego typu prac naukowych. Przedstawiony w pracy przegląd literatury zawiera 75 pozycji i jest adekwatny do postawionego w pracy problemu. Zastosowaną metodyką badawczą przez Doktoranta było modelowanie matematyczne i symulacje cyfrowe. Podejście to jest prawidłowe i nie budzi zastrzeżeń. Wyniki badań zostały zaprezentowane poprawnie i omówione w szczegółowy sposób.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy mogę ponadto stwierdzić, że doktorant posiada ogólną wiedzę teoretyczną wymaganą od osoby ubiegającej się o stopień doktora w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Najdobitniej zaprezentowano to w rozdziale czwartym, w którym przedstawiono między innymi opis modelu matematycznego wykorzystanego do przeprowadzenia analizy termodynamicznej.

Analiza przedstawionej rozprawy prowadzi również do wniosku, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Można to wywnioskować na podstawie tego, że Doktorant spójnie i poprawnie zaproponował różne warianty i przypadki analizowanego systemu energetycznego a następnie przeprowadził obliczenia oceniające rozważany system wg różnych kryteriów aby ostatecznie udowodnić podstawioną przez siebie

hipotezę badawczą. Dzięki postępowaniu zgodnie z wyznaczoną wcześniej strategią działania Doktorant krytycznie ocenił wszystkie wady i zalety rozważanego przez siebie układu.

Ponadto należy stwierdzić, że w rozprawie przedstawiono oryginalne rozwiązanie problemu naukowego jakim jest wykorzystanie sprężonego dwutlenku węgla w stanie nadkrytycznym do magazynowania energii. Najbardziej innowacyjna część rozprawy doktorskiej dotyczy systemu izobarycznych zbiorników na dwutlenek węgla, które zostały objęte ochroną patentową a Doktorant jest jednym ze współautorów tego patentu.

11. Wniosek końcowy

Mając na uwadze wymienione powyżej argumenty mogę stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Michała Brzuszkiewicza pt. „Analiza techniczno-ekonomiczna oraz optymalizacja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze” w pełni spełnia wymagania określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późniejszymi zmianami.

Podkreślić należy, że rozprawa ta spełnia następujące kryteria:

- prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka,
- wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Dr hab. inż. Łukasz Szablowski, prof. PW