

Dr hab. inż. Rafał KOBYLECKI, prof. PCz
Politechnika Częstochowska
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Katedra Zaawansowanych Technologii Energetycznych
ul. Dąbrowskiego 73, 42-201 Częstochowa
E-mail: rafal.kobylecki@pcz.pl

Częstochowa, 2025.05.26

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała BRZUSZKIEWICZA

PODSTAWA FORMALNA

Recenzja niniejsza została napisana w odpowiedzi na uchwałę Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 20.II.2025 (pismo nr RIE-BD.512.10.2025 z dnia 28.II.2025) oraz zawartą na jej podstawie z autorem niniejszej recenzji stosowną umową o dzieło nr UMC/0786/2025 (umowa na wykonanie recenzji do wniosku nr 713/UMC/RIE0-1/2025).

ZASADNOŚĆ TEMATYKI I ZAKRES OCENIANEJ ROZPRAWY

Będąca przedmiotem niniejszej oceny rozprawa doktorska mgr inż. Michała BRZUSZKIEWICZA nosi tytuł *Analiza techniczno-ekonomiczna oraz optymalizacja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze*. Rozprawę stanowi łącznie 128 stron maszynopisu, w tym spisy rysunków i tabel, jeden załącznik (Plan zagospodarowania terenu hybrydowego systemu magazynowania) oraz streszczenia (po polsku i po angielsku).

Praca (doktorat wdrożeniowy) poświęcona jest opracowaniu koncepcji nowatorskiego hybrydowego układu do magazynowania energii w różnych konfiguracjach, m.in. z wykorzystaniem jako medium magazynujące energię sprężonego dwutlenku węgla. Według zaproponowanej koncepcji układ powinien zapewniać dużą elastyczność pracy, co osiągnąć można poprzez implementację układu wytwarzania wodoru i tlenu (elektroliza z wykorzystaniem nadwyżek energii z PV), czy też układu do wytwarzania syntetycznego gazu ziemnego. Autor wykonał kilkuwariantowe obliczenia i symulacje pracy układu dokonując oceny możliwości implementacji tego rodzaju układu do istniejącego systemu energetycznego. W opracowanym przez doktoranta modelu obliczeniowym wykorzystano modele gazów rzeczywistych (CO_2 , H_2 , O_2 oraz CH_4), a symulując procesy produkcji w/w gazów założono równowagę składników w oparciu o zasadę minimalizacji energii swobodnej Gibbsa.

Odnosząc się do zasadności podjęcia tematyki rozprawy stwierdzić można, że jest ona bardzo aktualna, wpisując się w szeroko i powszechnie rozwijane w ostatnich latach na świecie zagadnienia magazynowania energii oraz jej konwersji z wykorzystaniem źródeł odnawialnych. W zamierzeniu Autora zaproponowana koncepcja układu magazynowania energii pozwolić powinna – w przypadku komercyjnej realizacji przemysłowej – na wykorzystanie nadwyżek mocy z OZE, skutkując „wypłasczeniem” zaburzeń strumienia energii elektrycznej dostępnej w sieci i w konsekwencji ograniczeniem strat, poprawą efektywności oraz wydłużeniem okresów niezawodnej eksploatacji maszyn i urządzeń tworzących system energetyczny.

Zaproponowana wielowariantowość układu stanowi niewątpliwie wartość dodaną, gdyż umożliwia elastyczne dostosowanie się operatora do bieżących warunków ekonomicznych poprzez analizę i śledzenie sytuacji na rynku energii. Uwzględniając powyższe, zakres merytoryczny zaprezentowany w recenzowanej rozprawie cechuje moim zdaniem niewątpliwie istotny potencjał użytkowy i aplikacyjny, o ile spełnione zostaną kryteria ekonomiczne (opłacalność inwestycji), silnie jednak uzależnione od aktualnej sytuacji polityczno-gospodarczej kraju miejsca potencjalnej aplikacji.

ELEMENTY NOWOŚCI NAUKOWEJ I ASPEKTY PRAKTYCZNE

W odniesieniu do zaprezentowanej w pracy analizy techniczno-ekonomicznej hybrydowego systemu magazynowania energii mogę stwierdzić, że najważniejsze elementy nowości i oryginalności ujęte w recenzowanej rozprawie stanowią:

- Przedstawiona koncepcja oraz struktura układu do magazynowania energii,
- Zaproponowanie adaptacji poeksploatacyjnych szybów kopalnianych jako zbiorników ciśnieniowych o wysokim potencjale dla magazynowania dwutlenku węgla,
- Zrealizowanie studium wykonalności dla systemu magazynowania energii z wykorzystaniem jako nośnika energii sprężonego dwutlenku węgla i wodoru.
- Stworzenie modelu oraz wykonanie obliczeń i ocena (w tym ekonomiczna) potencjalnej możliwości budowy zaproponowanej instalacji hybrydowej w zależności od różnych przyjętych uwarunkowań na rynku.

UKŁAD PRACY

Praca podzielona jest na 7 głównych rozdziałów, których kolejność i struktura nie budzą większych uwag.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp, a poprzedza go krótki spis najważniejszych symboli i oznaczeń. Treści merytoryczne w rozdziale pierwszym dotyczą głównie przedstawienia struktury mocy w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, a zwłaszcza roli i udziału źródeł niestabilnych (PV, siłownie wiatrowe) na kształtowanie się zmian dostępnej w systemie energii

elektrycznej, szczególnie w odniesieniu do epizodów, kiedy w systemie dostępne są nadwyżki mocy (okres intensywnego nasłonecznienia oraz okresy silnej wietrzności) mogące prowadzić do destabilizacji systemu i blackoutu. Tym samym, w tak pracującym systemie celowe jest podjęcie działań ukierunkowanych na zagospodarowanie nadmiarowej chwilowo mocy z jednoczesnym wprowadzeniem tanich, pewnych i elastycznych rozwiązań, umożliwiających szybkie pokrywanie niezbędnych deficytów mocy w okresach niedoboru energii w KSE – ze względu na znane ograniczenia, systemy wytwórcze oparte o duże udziały źródeł odnawialnych niestety nie zapewniają realnych możliwości uzupełnienia brakującej mocy.

Rozdział drugi rozprawy zawiera krótkie omówienie celu, zakresu oraz tezy pracy. Według zamierzeń Autora celem rozprawy jest przeprowadzenie wielokryterialnych analiz implementacji koncepcji hybrydowego zintegrowanego systemu magazynowania energii, zawierającego m.in.: cykl dwutlenku węgla (sprężanie i rozprężanie), układ technologiczny dla elektrolizy wody, układ umożliwiający syntezę metanu z CO_2 oraz H_2 oraz układ pozwalający na realizację tlenowego (o zmiennym składzie O_2/CO_2) spalania wytworzonego syntetycznego metanu pod wysokim ciśnieniem. Tlen do procesu oxyspalania stanowi produkt uboczny z procesu elektrolizy wody, zaś wytworzone w procesie spaliny (o wysokim ciśnieniu i temperaturze) kierowane są do ekspandera gdzie następuje konwersja entalpii spalin w energię elektryczną. Zawartą w rozdziale drugim tezę rozprawy sformułowano następująco: „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” i wpisuje się ona w główne cele zaproponowane przez Doktoranta do osiągnięcia w ramach realizacji rozprawy.

Trzeci rozdział pracy poświęcony jest lapidarnemu przedstawieniu oraz omówieniu wybranych technologii magazynowania energii w postaci: energii potencjalnej (systemy grawitacyjne), elektrowni szczytowo-pompowych, sprężonego lub ciekłego powietrza, sprężonego dwutlenku węgla, wodoru oraz syntetycznego gazu ziemnego (syntetyczny metan). Autor przedstawił główne zalety oraz wady rozwiązań układów magazynowania energii, jak również osiągane sprawności, orientacyjne koszty, możliwości magazynowania oraz wpływ danego rozwiązania na środowisko.

W rozdziale czwartym przedstawiono koncepcję całego systemu, odnosząc się i omawiając szczegółowo m.in. układ (podsystem) magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla, układ (podsystem), gdzie następuje wytwarzanie wodoru i tlenu oraz układ (podsystem), gdzie realizowana jest konwersja energii w energię elektryczną w procesie tlenowego spalania syntetycznego metanu. Autor przedstawił i odniósł się zarówno do założeń (wariantowość obliczeń), jak i do przyjętej metodologii oraz uzyskanych wyników.

Rozdział piąty rozprawy obejmuje przede wszystkim kwestie ekonomiczne i poświęcony jest m.in. szacowaniu wskaźników NPV (zaktualizowana wartość netto), IRR (wewnętrzna stopa zwrotu) oraz analizie szeroko rozumianych przepływów pieniężnych dla proponowanej koncepcji (projekt układu). Przedstawiono różne koncepcje (warianty) układu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze, opracowując odpowiedni model obliczeniowy dla każdego z wariantów. Analizowane i przedstawione w rozdziale piątym rozprawy warianty omawianego systemu hybrydowego obejmują trzy warianty: 1/ bazowy (bez wprowadzania CO₂ ze źródeł zewnętrznych oraz bez wyprowadzania syntetycznego CH₄), 2/ wariant gdzie ciepło reakcji metanizacji stanowi produkt handlowy oraz 3/ wariant, gdzie strumień syntetycznego metanu jest przekazywany do odbiorców zewnętrznych na warunkach komercyjnych. Dla każdego z powyższych wariantów Doktorant wykonał obliczenia i analizy dla przyjętych dwóch różnych czasów trwania fazy rozładowywania magazynu (2 i 4 godziny).

Rozdział szósty zawiera główne konkluzje oraz wnioski płynące z realizacji pracy, poruszane są m.in. kwestie efektywności technicznej danego systemu magazynowania; ponadto Doktorant omawia najbardziej obiecujące warianty w odniesieniu do aktualnych i przewidywanych perspektyw oraz wymagań dla realizacji ewentualnego wdrożenia.

Siódmy rozdział stanowi spis literatury, po którym następują kolejno spisy tabel i rysunków, załącznik (plan zabudowy układu) oraz streszczenia po polsku i po angielsku.

POZIOM WARSZTATOWY I OCENA ROZPRAWY

Moim zdaniem poziom warsztatowy rozprawy – w tym przyjęta koncepcja, struktura, opis i analiza treści merytorycznych, jak również analiza i ocena wyników – ocenić należy ponadprzeciętnie. Praca napisana jest poprawnym językiem, a przedstawiane treści i wywody są logiczne, tworząc spójną merytorycznie całość. Układ rozprawy nie budzi większych uwag, a język oraz użyte sformułowania są w przeważającej części jasne i zrozumiałe.

W ramach realizacji rozprawy Autor opracował koncepcję układu hybrydowego do magazynowania energii, tworząc model obliczeniowy i wykonując kilkuwariantowe obliczenia oraz symulacje pracy układu w różnych konfiguracjach. Warto podkreślić jest, że stworzony przez Doktoranta model obliczeniowy może być wykorzystany w praktyce. Uważam, że tematyka podjęta w rozprawie jest aktualna, zaś uzyskane wyniki mają niewątpliwie perspektywę użyteczną, choć podkreślić należy, że jest ona uzależniona od aktualnej sytuacji rynkowej i póki co jeszcze dyskusyjna od strony opłacalności finansowej.

Zdaniem recenzenta, wyniki uzyskane przez Doktoranta są oryginalne, stanowią realny i praktyczny wkład do rozwoju obecnego stanu wiedzy, zwłaszcza w zakresie szeroko rozumianych układów i systemów magazynowania energii.

UWAGI KRYTYCZNE

Uwag merytorycznych i stylistycznych do treści rozprawy jest niewiele i mają one w przeważającej części charakter drobnych niedociągnięć, nie wpływających istotnie na ogólną pozytywną ocenę pracy. Główne uwagi recenzenta odnośnie treści i sformułowań zawartych w rozprawie to:

1. Dane pokazane na rys. 1.1 obejmują okres do roku 2023 a nie 2024 jak zaznaczono w podpisie.
2. Na końcu pierwszego akapitu na str. 12 brak jest cytowania. Proszę w tym miejscu o wyjaśnienie w jaki sposób możliwa jest – jak pisze Autor – realizacja jednocześnie tanich i wysokosprawnych systemów magazynowania?
3. Brak cytowania literatury na str. 13; rozdział 2 powinien mieć raczej tytuł „Cel, tezy i zakres pracy”.
4. Proszę o wyjaśnienie (Tabela 3.1) jakie są koszty inwestycyjne przedstawionych technologii?
5. Należy unikać w pracy sformułowań nieprecyzyjnych typu: „stosunkowo niska/wysoka”, „optymalne”, itp. (np. str. 21, 28, 39, 51, 109). W takich miejscach powinny być przytaczane konkretne jednoznaczne wartości lub ich zakres (od...do...).
6. Proszę szerzej wyjaśnić (str. 25 tekst pod rys. 3.6) z czego jest oczyszczane powietrze wprowadzane do LAES?
7. Proszę o weryfikację (Tabela 3.2) czy faktycznie przytoczone koszty dla instalacji 1 MW są wyższe niż dla 10 MW?
8. Brak wyjaśnienia – choćby krótkiego – jakie przyjęto założenia dla systemu Hy-Chees (str. 33)?
9. Brak wyjaśnienia oznaczeń oraz niejasny podpis pod rys. 4.3.
10. Na str. 50 (podrozdział 4.4.2) zamiast słowa „dnia” powinno chyba być „doby”?
11. Rozdz. 4.6.3: dobrze byłoby zaprezentować uzyskane wyniki w formie rysunków lub wykresów – ich prezentacja w formie tabel jest dość kłopotliwa i trudniejsza do analizy.
12. Dokładność wyników zestawionych w Tabeli 4.29 jest chyba zbyt wysoka – należałoby zaokrąglić wartości do liczb całkowitych.
13. Proszę wyjaśnić (str. 98) co to jest „współczynnik korekcyjny dla magazynów energii”?
14. Tabela 5.2: sprzedaż wodoru powinna być w [t/rok].
15. Z czego wynikają pokazane różnice w przyjętych kosztach elektrolizera dla różnych wariantów (Tabela 5.3)?
16. Str. 105: co oznacza zwrot, że „wartości IRR nie znaleziono”?
17. Co jest głównym czynnikiem (np. rozdz. 5.3.1, lecz także str. 110) powodującym, że konieczne jest „wsparcie finansowe” aby projekt był opłacalny?

18. W rozdziale 6 zamiast słowa „badania” chyba lepiej byłoby użyć „obliczenia” lub „symulacje”? Ponadto zamiast prezentować sumaryczne nakłady (zł) wygodniej chyba byłoby je pokazać w [zł/MW] lub [zł/MWh]?
19. Czy rynek magazynów elektrochemicznych (rozdz. 6.4) ma praktyczne znaczenie wdrożeniowe w dużej skali: to chyba ślepa uliczka technologii, tym bardziej, że wciąż hojnie dotowany, a mimo to efekty co najmniej dyskusyjne – proszę o komentarz.
20. Część pozycji zestawionej w bibliografii jest niepełna.

WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu przedstawionej treści recenzji uważam, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Michała BRZUSZKIEWICZA p.t. *Analiza techniczno-ekonomiczna oraz optymalizacja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze* zawiera – zarówno w aspekcie naukowym, jak i praktycznym – elementy oryginalne, które stanowią wkład do rozwoju wiedzy w obszarze szeroko rozumianej inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Kompozycja, zakres oraz treść merytoryczna recenzowanej pracy spełniają moim zdaniem wymagania stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i tym samym **wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Podpisał Rafał Kobyłecki