

dr hab. inż. Piotr Olczak, prof. instytutu
Instytut Gospodarki Surowcami
Mineralnymi i Energią PAN
ul. J. Wybickiego 7a, 31-261 Kraków
e-mail: olczak@min-pan.krakow.pl

Kraków, 11.04.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Brzuszkiewicza

pt.: *Analiza techniczno-ekonomiczna oraz optymalizacja hybrydowego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze*

1. Podstawa formalna recenzji

Przedmiotową recenzję opracowałem jako recenzent wyznaczony uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Pismo o znakach *RIE-BD.512.10.2025* w dniu 28.02.2025 r. wystosował do mnie Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej – prof. dr hab. Krzysztof Labus.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. inż. Michała Brzuszkiewicza powstała pod opieką Pana dr. hab. inż. Łukasza Barteli, prof. uczelni, pełniącego w przewodzie doktorskim obowiązki promotora. Praca ma charakter wdrożeniowy i opiekunem z ramienia przedsiębiorcy (Energoprojekt-Katowice S.A.) był dr inż. Jakub Tuka. Praca liczy łącznie 128 numerowanych stron i składa się z 6. rozdziałów oraz z części uzupełniających, tj. spisu treści, bibliografii (75 pozycji), spisów oznaczeń, rysunków i tabel, jednego załącznika. Dodatkowo zamieszczono streszczenie w języku polskim oraz w języku angielskim.

Problematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy koncepcji projektu wdrożeniowego (realizowanego m. in. we współpracy Politechniki Śląskiej i Energoprojekt-Katowice S.A.) w zakresie magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla i wodorze. Jest to szczególnie ważny temat w kontekście rosnących wartości mocy zainstalowanych w źródłach niesterowalnych (turbiny wiatrowe i instalacje fotowoltaiczne). Zjawisko to z kolei wymusza konieczność bilansowania tych źródeł m.in. poprzez magazynowanie energii elektrycznej.

Obecnie w Polsce nie istnieją proponowane i analizowane w rozprawie doktorskiej typy instalacji. Także zagadnienie produkcji syntetycznego gazu z dwutlenku węgla i wodoru, a dalej energii elektrycznej jest nowatorskie w obszarze analiz Doktoranta (z uwzględnieniem specyficznych warunków magazynowania, w tym z użyciem szybu pokopalnianego).

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Treść rozprawy

Rozdział 1. Wstęp (s. 7–13) zawiera charakterystykę Krajowego Systemu Elektroenergetycznego w kontekście wzrostu mocy zainstalowanych źródeł ogółem, zmiany struktury wytwarzania oraz wolumenów generacji energii z instalacji fotowoltaicznych i turbin wiatrowych. Autor porusza także tematykę rynkowych cen energii elektrycznej oraz potrzeb w zakresie magazynowania energii elektrycznej niezbędnych do realizacji dalszych planów zwiększania wolumenu mocy zainstalowanej w źródłach pogodowo zależnych i stopniowego wyłączania elektrowni zawodowych zasilanych węglem kamiennym energetycznym.

W ramach rozdziału 2. (s. 14–16) Autor zamieścił cel i zakres pracy oraz Tezę doktoratu. Teza to: technicznie możliwa i ekonomicznie uzasadniona jest rynkowa adaptacja hybrydowego i skalowalnego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze z wykorzystaniem dla niskociśnieniowego dwutlenku węgla referencyjnej objętości szybu pokopalnianego. Autor w tym rozdziale odnosi się do częściowych wyników opublikowanych w cytowanym artykule oraz do patentu, którego jest współautorem.

Rozdział 3. (s. 17 - 32) zawiera przegląd technologii magazynowania energii, wśród których omówione zostały systemy grawitacyjne, elektrownie szczytowo-pompowe, systemy oparte na sprężonym powietrzu, a także ciekłym powietrzu, sprężonym dwutlenku węgla. Ponadto Autor w analizie uwzględnił systemy magazynowania energii elektrycznej w wodorze (oparte o różne typy elektrolizerów) i w syntetycznym gazie ziemnym.

W rozdziale 4. Autor przedstawił koncepcję systemu magazynowania energii elektrycznej i ciepłej bazującego na projekcie pn. Hy-Chees¹. Szczegółowo opisał elementy systemu tj. podsystemy: magazynowania energii elektrycznej, wykorzystujący procesy sprężania oraz rozprężania dwutlenku węgla; produkcji wodoru oraz tlenu w procesie elektrolizy; produkcji syntetycznego gazu ziemnego w procesie syntezy metanu z wodoru oraz dwutlenku węgla; produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem procesu tlenowego spalania syntetycznego gazu ziemnego. Ostatni z podrozdziałów dotyczy analiz termodynamicznych (s. 52–91). W ramach tego najobszerniejszego w pracy podrozdziału zostały zawarte wybrane wyniki analiz (tab. 4.3. – 4.26).

Rozdział 5. (s. 92–108) zawiera metodykę, założenia oraz wyniki analizy ekonomicznej z podziałem na warianty techniczne zdefiniowane w rozdziale nr 4.

Rozdział 6. (s. 247–250) stanowią wnioski z wykonanej pracy, głównie w zakresie potwierdzenia postawionej tezy pracy (szczególnie definiując warunki konieczne dla uzyskania rentowności ekonomicznej dla projektu). W rozdziale tym wyszczególniono znaczenie wdrożeniowe pracy.

3.2. Ocena merytoryczna pracy

W zakresie postawionego celu badawczego: „przeprowadzenie wielokryterialnych analiz dla koncepcji magazynowania energii wykorzystującego jednostkowe procesy konwersji energii: - proces sprężania oraz ekspansji dwutlenku węgla, - proces elektrolizy wody, - proces syntezy metanu z wykorzystania dwutlenku węgla i wytworzonego w procesie elektrolizy wodoru, - proces tlenowego wysokociśnieniowego spalania wytworzonego metanu syntetycznego z zasilaniem spalinami ekspandera.”, Doktorant dokonał szczegółowych wielowariantowych analiz technicznych i ekonomicznych dla przedstawionej koncepcji magazynowania energii. W kontekście tytułu pracy i przeprowadzonych analiz brakuje jednak szczegółów dotyczących optymalizacji. Należy nadmienić, że analizy zostały wykonane na oryginalnej koncepcji systemu magazynowania energii związanego z realizowanym projektem Hy-Chees.

W odniesieniu do sformułowanej w rozprawie doktorskiej tezy można stwierdzić, że: technicznie jest możliwa i ekonomicznie uzasadniona rynkowa (w kontekście cen energii, paliw, urządzeń) adaptacja hybrydowego i skalowalnego systemu magazynowania energii w sprężonym dwutlenku węgla oraz wodorze z wykorzystaniem

¹ Wyjaśnienie dotyczące nazwy projektu znajduje się dopiero na str. 53 rozprawy

dla niskociśnieniowego dwutlenku węgla referencyjnej objętości szybu pokopalnianego. Możliwość ta została wykazana w specyficznych warunkach cenowych (np. wariant IIIA i IIIB dla stawek zakupu energii w scenariuszu cenowym „200%/20%”), które jednak mogą w przyszłości występować częściej ze względu na zachodzące zmiany na rynku energii elektrycznej w Polsce.

Podsumowując, jednoznacznie stwierdzam, że Doktorant zrealizował postawiony w pracy cel i udowodnił postawioną w niej tezę.

3.3. Pytania do Doktoranta

Gruntowna analiza pracy pozwoliła wskazać pewne obszary niejasności, które wymagają precyzyjniejszego wyjaśnienia i przedstawienia:

1.
 - a. Proszę o przedstawienie algorytmu obliczeniowego dla wyników zawartych w tabelach w rozdziale 4.6.
 - b. Proszę o przedstawienie przykładowych powiązań wartości parametrów zawartych w tych tabelach z parametrami użytymi we wzorach w tym też rozdziale. Wyjaśnienie powinno zawierać: w jaki sposób osiągnięto te wyniki (w tym za pomocą których wzorów je obliczono oraz w oparciu o jakie dane wejściowe).
2. Autor poprawnie określił, że dla okresu czterogodzinnego nakłady inwestycyjne dla poszczególnych wariantów obliczeniowych będą niższe w porównaniu do nakładów dla urządzeń dobranych dla okresu dwugodzinnego.
 - a. Proszę o określenie wpływu długości okresu rozładowywania na sprawność², zwłaszcza dla wariantu IIA i II B (tab. 4.30). Pytanie dotyczy wartości sprawności w zakresie wytwarzania energii (proces rozładowywania).
 - b. Proszę o przedstawienie na wykresach pracy urządzeń w wybranym (dowolnie) okresie kilku dni (m.in. wytwarzana energia, sprawność, ceny energii).
 - c. Czy założono rozładowywanie w godzinach np. między 18 a 22? Każdego dnia, w identyczny sposób?

W rzeczywistych warunkach rynkowych cen energii, okres czterogodzinny skutkuje m.in. niższymi średnimi cenami potencjalnej sprzedaży niż w przypadku okresu dwóch godzin. Ma to miejsce wtedy, gdy proces rozładowania jest uzależniony od czasu występowania maksymalnych cen

² W kontekście obliczeń w skali roku zalecam używanie określenia „efektywność”, zamiast „sprawność”.

w skali dobowej (godziny występowania maksymalnych cen wykazują sezonową zależność).

d. Jaką liczbę cykli ładowania/ rozładowania założono w skali roku, w kontekście także zakładanych lub wymuszonych przerw na remonty i przeglądy instalacji (o których to Autor wspomniał w części dotyczącej kosztów na s. 104).

3. W tytule pracy jest wyraz „optymalizacja”.

a. proszę o wyjaśnienie jaką funkcją celu ją zrealizowano, jakie kryteria uwzględniono?

Ogólnie zapisy dotyczące optymalizacji wymagają doprecyzowania: np. s. 21 „optymalizacja obciążenia”; s. 91 „system został sprofilowany dla maksymalizacji sprawności”

b. Czy to może oznacza, że optymalizacja polegała na osiągnięciu najwyższej mocy dla największego urządzenia? (s. 91).

3.4. Uwagi edycyjne i redakcyjne

W przygotowanej pracy zauważyłem uchybienia natury edycyjno-redakcyjnej, jednak nie wpływają one w znaczący sposób na jakość merytoryczną całości rozprawy. Wśród nich wyróżniam następujące:

1. zamienne stosowanie „dwutlenek węgla”, CO₂, CO₂ - nie zawsze oznaczając to samo: niekiedy CO₂ oznacza np. system jak na s. 33 – 34 „dwutlenku węgla (CO₂)”, z kolei „CO₂” oznacza np. utylizację dwutlenku węgla, tony na rok (s 96),
2. w wielu miejscach rozprawy brakuje odwołań do literatury m.in. na s. 24, 29-30, 51-52, 100-101. W takich przypadkach nie jest wiadome czy prezentowane dane lub wnioski są wynikiem prac Autora, czy może bazują one na źródłach literaturowych, a brak odwołania jest wynikiem np. omyłki pisarskiej,
3. s. 32 pierwsze cztery linie tekstu zawierają jedenaście odwołań literaturowych – zdecydowanie za wiele, zwłaszcza że nie dostarczają specyficznych informacji. Natomiast w innych częściach pracy odwołań jest zdecydowanie za mało,
4. s. 33 wymieniony został z nazwy projekt Hy-Chees, lecz jego wyjaśnienie zawarte jest dopiero na s. 53,
5. s. 39 rys. 4.3. brakuje poprawnie opracowanej legendy,
6. s. 39 „Oszacowane koszty budowy systemów zbiorników okazały się bardzo wysokie” nie jest jasne przez kogo zostały oszacowane koszty – nie ma odwołania literaturowego, ani wspomnianych np. własnych badań Autora,

7. s. 54: zbyt złożone zdanie „Choć obniżenie temperatury gazu na wlocie do kolejnego stopnia sprężarki pozwala na redukcję wartości jednostkowej pracy niezbędnej dla osiągnięcia wymaganego ciśnienia, co prowadzi do zmniejszenia energochłonności procesu sprężania, to zastosowanie chłodzenia międzystopniowego jest również odpowiedzialne za wyprowadzenie ciepła z osłony kontrolnej systemu magazynowania energii, które najczęściej stanowi ciepło bezpowrotnie tracone.”
8. tab. 4.2. brakuje nawiązania do wcześniej wymienionych w tekście rozprawy wzorów i parametrów użytych w tych wzorach. Brakuje także odwołań do źródeł: w jaki sposób określono wartości parametrów,
9. dla wzorów 4.7, 4.10, 4.11: zapis nie jest jasny. Proszę o przedstawienie na kilku przykładach jakie wartości składowe tych wzorów mogą być osiągane w analizowanym systemie,
10. wzory – nie jest jasny cel zapisu przecinka na końcu wzorów, brakuje także w wielu przypadkach wartości referencyjnych (także w formie odwołania do np. tabeli),
11. wzór 4.3. nie jest jasne czy strumień masowy powinien dotyczyć przepływu przez ekspander, a nie jak zapisano sprężarki?
12. tab. 5.2. brakuje nawiązania do symboli ze wzorów, co czyni wyznaczone wartości wątpliwymi,
13. tab. 5.3. zawiera wiele danych ekonomicznych i wyliczeń, brakuje jednak źródeł danych oraz wartości parametrów, np. pojemności zbiorników, mocy nominalnych (częściowo zawartych w tab. 4.27³),
14. cz. 5.2.3. zawiera opis dotyczący nakładów inwestycyjnych oraz ich podsumowanie, brakuje jednak odwołania do Tab. 5.3,
15. cz. 5.3. dla wyników NPV nie podano wartości stopy dyskontowej „r” (na s. 104 jest „WACC realny”),
16. tab. 5.6 zawiera dodatkowe informacje, nie ujęte wcześniej w procesach obliczeniowych, takiej jak: „wynik na kosztach zmiennych⁴”, „wynik operacyjny (EBIT)”, EBITDA. Nie jest jasne także czy podane wartości dotyczą np. tys. zł/rok. Dodatkowo na kolejnych stronach Autor oblicza i analizuje wartości EBIT i EBITDA w ramach analizy wrażliwości, co wskazuje na brak konsekwencji w stosunku do wcześniejszych obliczeń NPV. Proszę o wyjaśnienie zastosowania do porównania wariantów EBIT i EBITDA, które nie są typowymi miernikami

³ Znak „?” wynika m.in. z niepewności czy urządzenia dobierano dokładnie pod wskazaną moc w tabeli 4.27 czy dobierano urządzenia dostępne na rynku (np. z katalogów lub ofert producenckich) o mocy zbliżonej do wyliczonej.

⁴ Pojęcie nie występujące w literaturze

oceny efektywności ekonomicznej inwestycji w metodach dyskontowych⁵, dla których Autor zdefiniował stopę dyskonta „r”.

Ponadto, wybrane oczywiste omyłki to:

rys. 3.7. „niskokociśnieniowy”, s. 41 „zlikwidowanych” → „zlikwidowana”, s. 60 „obiorcy”, wzór 6.1. przecinek/prim; s. 25 „wykorzystywany jest” → „wykorzystywane jest”; wzór 4.1. podwójne „i” w indeksach dolnych.

4. Wniosek końcowy

Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu narzędzi obliczeniowych. Przedłożona praca przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu badawczego i pomimo wymienionych, głównie w rozdziale trzecim, uwag i uchybień prezentuje ona dobry poziom merytoryczny, m.in. ze względu na postawiony cel badawczy oraz przedstawione rozwiązanie o charakterze aplikacyjno-wdrożeniowym.

Biorąc pod uwagę całość pracy i powyższe przedstawione spostrzeżenia, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim. Tym samym jest to jedna z podstaw do nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Jednocześnie wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Piotr Olszak

⁵ Gdyby wystąpiły przesłanki do porównania wariantów inwestycyjnych za pomocą EBIT lub EBITDA, to takie uzasadnienie powinno być zawarte w tekście rozprawy.

