

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Ochmanna pt. „ *Analiza cieplno-przepływowa zasobnika ciepła ze złożem porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu* ”

Wstęp

Niniejszą recenzję opracowałem na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* Politechniki Śląskiej z dnia 20 listopada 2025 roku oraz zgodnie z pismem RIE –BD.512.52.2025 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Pana Prof. dra hab. inż. Krzysztofa Labusa zlecającym wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej.

Recenzja zawiera następujące części:

1. Ogólną charakterystykę rozprawy,
2. Charakterystykę tematu oraz tezę rozprawy,
3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego,
4. Uwagi i kwestie dyskusyjne,
5. Ocenę pracy jako rozprawy doktorskiej,
6. Wniosek końcowy.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa zawiera 256 stron tekstu podstawowego , podzielonego na 5 rozdziałów , Podsumowanie, Załączniki, Spis rysunków i tabel , Bibliografię zawierającą 320 wielojęzycznych pozycji bibliograficznych zestawionych w kolejności alfabetycznej , Streszczenie w języku polskim i angielskim.

Pracę można roboczo podzielić na trzy części merytoryczne:

- *Część pierwszą* ogólną, obejmującą Wprowadzenie , w którym przedstawiono charakterystykę problemu , przegląd literatury z zakresu systemów magazynowania energii. W tej części na tle stanu przedmiotowego zagadnienia określono cele i zakres rozprawy oraz przedstawiono ogólną problematykę związaną z tematem pracy.
- *Część drugą*, obejmującą rozdziały (2-3) , która zawiera zagadnienia badań eksperymentalnych, badań numerycznych , problematykę walidacji opracowanych modeli numerycznych.
- *Część trzecią* , obejmującą rozdziały (4-5) dotyczące zagadnień optymalizacyjnych zasobnika TES, modelowania systemu magazynowania A-CAES z wykorzystaniem opracowanych modeli numerycznych. Ważną kwestią jest tutaj dokonanie syntezy wykonanych przez Doktoranta badań , a także Podsumowanie i wnioski końcowe.

Struktura pracy jest ogólnie poprawna. Strona formalna pracy jest zasadniczo właściwa. Praca napisana jest dobrym językiem naukowo-technicznym. Należy stwierdzić na tej podstawie, że Autor rozprawy wykazał się umiejętnością pisania prac o charakterze naukowym.

2. Charakterystyka tematu oraz celu rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej pt. „*Analiza cieplno-przepływowa zasobnika ciepła ze złożem porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu*” jest istotna zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat powstało stosunkowo niewiele opracowań kompleksowych o tematyce przedstawionej w rozprawie. Jest to zagadnienie, którego złożoność wynika głównie z wieloaspektowej natury problemów decyzyjnych i trudności w ich techniczno-matematycznym modelowaniu. Problem naukowy rozważany w pracy jest zatem bardzo aktualny i ważny szczególnie w tym okresie, kiedy realizacja zasad gospodarki rynkowej w obecnej sytuacji geopolitycznej powinny być odpowiednio skorygowane. Badania nad problematyką rozważaną w rozprawie zarówno w kraju jak i zagranicą są już prowadzone od pewnego czasu. Ich wyniki pomimo, że opracowano wiele metod i procedur nie dają się w sposób prosty zastosować bezpośrednio do zagadnień rozważanych w rozprawie, stwarzając wiele utrudnień aplikacyjnych.

Pozytywnie więc oceniam fakt, że Doktorant podjął tak złożony i bardzo aktualny problem, zajmując się w rozprawie prezentacją oryginalnych, kompleksowych i wielowariantowych badań eksperymentalnych i numerycznych zasobnika ciepła ze złożem porowatym, pełniącego funkcję akumulatora ciepła w układzie A-CAES. Motywacją do podjęcia badań była zapewne koncepcja (opisana w patencie europejskim „*Undeground Compressed Air Storage Installation, 3792467*”, dostępne na: <https://data.epo.org/> autorstwa: Ł. Bartela, M. Lutyński, G. Smolnik, i S. Waniczek), obejmująca wykorzystanie poeksploatacyjnego szybu górniczego jako miejsca instalacji pełnoskalowego magazynu ciepła oraz rezerwuaru sprężonego powietrza. Uwarunkowania geometryczne szybu górniczego determinują konieczność zastosowania zasobnika ciepła o znacznie wyższej wartości współczynnika smukłości, rozumianej jako stosunek długości do jego średnicy wewnętrznej, w porównaniu do rozwiązań dotychczas opisywanych w literaturze. W przeprowadzonym przez Kandydata przeglądzie literaturowym wykazano istotną lukę badawczą w zakresie badań podstawowych nad zasobnikami ciepła ze złożem porowatym charakteryzującymi się wysoką wartością współczynnika smukłości. Luka ta stała się bezpośrednią podstawą do sformułowania i realizacji planu badawczego rozprawy.

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych i numerycznych w rozprawie przedstawiono oryginalną metodykę pozwalającą na analityczne wyznaczenie wartości stopnia naładowania zasobnika ciepła, dla którego odnotowywany jest znaczący wzrost wartości straty wylotowej w czasie etapu ładowania, co bezpośrednio wskazuje na wyczerpywanie się zdolności złoża do akumulacji większej ilości energii. Metodyka ta może stać się narzędziem pomocniczym w procesie projektowania zasobnika ciepła, gdyż pozwala również na wyznaczenie minimalnej objętości złoża akumulacyjnego dla przyjętych warunków brzegowych funkcjonowania systemów magazynowania energii.

Za szczególnie istotne, jako recenzent pracy uważam dokonanie integracji wyników badań eksperymentalnych i numerycznych zasobnika ciepła z termodynamicznym modelem adiabatycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Pozwoliło to na ocenę wpływu parametrów zasobnika ciepła o wysokiej smukłości (powyżej 8,0) na sprawność energetyczną i egzergetyczną całego układu A-CAES oraz na porównanie modeli o różnym stopniu szczegółowości.

Taki sposób podejścia zaproponowany przez Autora rozprawy daje możliwości określania racjonalnych założeń dla konstruowania racjonalnych procedur budowy i eksploatacji, a także i planów rozwojowych/inwestycyjnych w warunkach rynkowych. Biorąc pod uwagę powyższe aspekty praca doktorska mgr. inż. Jakuba Ochmanna jest aktualna i dotyczy ważnych problemów w energetyce i gospodarce energetycznej.

Zaproponowana przez Doktoranta metodyka analizy ciepłno-przepływowej bazuje na ocenie porównawczej różnorodnych modeli eksperymentalnych i numerycznych prowadzącą finalnie do coraz bardziej dojrzałych rozwiązań technicznych i jest oryginalnym podejściem Autora, służącym do rozwiązania postawionego problemu, a także jest Jego wkładem w rozwój dyscypliny naukowej, której poświęcona jest rozprawa doktorska tj. *Inżynieria Środowiska/Energetyka* z jasnym określeniem relacji Jego osiągnięć do dyscypliny naukowej *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* wg obowiązującej klasyfikacji dyscyplin naukowych. Postawione przez Autora cele pracy są oryginalne. Przedstawiony problem naukowy jest aktualny i ważny, szczególnie w obecnym okresie. Zagadnienia naukowe przedstawione w pracy są w ogólności sprecyzowane w sposób wystarczająco jasny i jednoznaczny.

3. Rozwiązanie postawionego problemu naukowego

Badania i analizy przeprowadzone przez Kandydata dotyczą badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych, przy czym badania eksperymentalne objęły trzy geometrie zasobnika ciepła o różnych wartościach parametru smukłości, przy zachowaniu stałej objętości złoża akumulacyjnego. Takie podejście umożliwiło jednoznaczną ocenę wpływu smukłości na kluczowe parametry eksploatacyjne magazynu ciepła, w tym spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez złożo, dynamikę przyrostu stopnia naładowania zasobnika oraz czas osiągnięcia progowej wartości straty wylotowej podczas etapu ładowania. Dodatkowo każdy wariant geometryczny był analizowany dla dwóch granulacji materiału akumulacyjnego, co pozwoliło na ocenę sprzężonego wpływu cech geometrycznych zasobnika i właściwości złoża.

Istotnym elementem rozprawy mgr. inż. Jakuba Ochmanna jest opracowanie autorskiego modelu numerycznego zasobnika ciepła utworzonego w programie ANSYS Fluent, zwalidowanego w oparciu o własne wyniki eksperymentalne dla wszystkich analizowanych wariantów geometrycznych i granulacji złoża. Model ten wykorzystano następnie do przeprowadzenia analizy wrażliwości oraz optymalizacji konstrukcji zasobnika w skali laboratoryjnej z punktu widzenia maksymalizacji sprawności energetycznej.

Na podstawie wyników eksperymentalnych i numerycznych Kandydat opracował metodykę pozwalającą na analityczne wyznaczenie wartości stopnia naładowania zasobnika ciepła, dla którego odnotowywany jest znaczący wzrost wartości straty wylotowej w czasie etapu ładowania, co bezpośrednio wskazuje na wyczerpywanie się zdolności złoża do akumulacji większej ilości energii. Metodyka ta może stać się narzędziem pomocniczym w procesie projektowania zasobnika ciepła, gdyż pozwala również na wyznaczenie minimalnej objętości złoża akumulacyjnego dla przyjętych warunków brzegowych funkcjonowania systemów magazynowania energii.

Za oryginalne osiągnięcia Autora pracy uznałbym:

- *zapropozowanie podejścia badawczego, polegającego na stworzeniu metodyki badań , zaplanowanie i wybudowanie stanowiska badawczego modeli symulacyjnych zasobnika dla systemu o wielkości odpowiadającej potrzebom rozwiązań wielkoskalowych ;*
- *przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych oraz numerycznych w zakresie wpływu smukłości cylindrycznych zasobników ciepła z wypełnieniem skalnym na efektywność techniczną procesu magazynowania energii z wykorzystaniem sprawności energetycznej oraz egzergetycznej;*
- *kompleksowe, porównawcze badania eksperymentalne zasobników o stałej objętości i zróżnicowanej smukłości;*
- *opracowanie i walidację modelu CFD zasobnika ciepła ze złożem porowatym;*
- *opracowanie uniwersalnej metodyki stanowiącej wsparcie w procesie projektowania magazynów ciepła ze złożem akumulacyjnym;*
- *przeprowadzenie optymalizacji konstrukcji zasobnika z wykorzystaniem metody płaszczyzny odpowiedzi;*
- *ocenę pracy adiabatycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu wykorzystującego poeksploatacyjny szyb górniczy jako miejsce instalacji zasobnika ciepła i rezerwuuar sprężonego powietrza;*
- *zaprezentowanie walorów aplikacyjnych zaproponowanej metodyki badawczej.*

W świetle powyższego uznaję , że założone cele pracy zostały osiągnięte . Ponadto w mojej opinii jako recenzenta rozprawy , metodyka analizy cieplno-przepływowej zasobnika ciepła przedstawiona przez Autora , może być wykorzystana w innych badaniach i kompleksowych analizach techniczno-ekonomicznych dla racjonalnego sterowania/zarządzania procesami magazynowania energii w gospodarce krajowej prowadzonych w podsektorach energetycznych , po wprowadzeniu stosownych modyfikacji odpowiednich baz danych wejściowych i procedur obliczeniowych.

4. Uwagi i kwestie dyskusyjne

Jako recenzent rozprawy zgłaszam następujące uwagi i kwestie dyskusyjne:

Uwagi ogólne:

1. Teza pracy w mojej opinii jest zbudowana tak „mało zdecydowanie” , a w zasadzie w sposób „utajony” , że może powodować niejasności , gdyż zastosowanie takiego „trybu opisowego” nie ułatwia percepcji ewentualnemu odbiorcy/czytelnikowi w zrozumieniu podstawowej kwestii tj. co konkretnie Doktorant chce udowodnić ??

Byłoby chyba lepiej zapisać tezę, korzystając z prostej składni i szyku zdań przykładowo (jedna z wersji) :

„Metodyka przedstawiona w rozprawie umożliwia kompleksową analizę ciepłoprzeplywową zasobnika ciepła ze złożem porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu ”.

2. W rozprawie stosunkowo często Doktorant do opisu problematyki używa słów, które są „nadmiarowe”. Przykładem jaskrawym jest „*metodologia*” – czy rzeczywiście autor rozprawy stworzył już „*logię*”, czyli naukę ?? Byłoby lepiej zastosować tutaj przykładowo słowo „*metodyka*”.

3. Rozumiem Doktoranta, że chciał wprowadzić ewentualnego czytelnika w złożone zagadnienia rozprawy, ale szczególnie początkowe fragmenty pracy są nieco rozwlekłe - byłoby lepiej ograniczyć się „*do syntezy*”. Rozprawa i tak jest bardzo obszerna, a i zyskałaby na tym kompozycja rozprawy. Należy unikać takiego stylu pisania w poważnych pracach naukowych.

B. Uwagi szczegółowe:

1. Tytuł rozprawy w języku angielskim (s.311) „doszczegóławia” wersję polską (s.307);
2. Strona 14. Wiersze 10/11. od dołu – energia podana w jednostkach mocy ?;
3. Strona 17. Wiersz 9. góra – proszę o komentarz, czy doktorant uczestniczył w patencie P.3792467 ??;
4. Strona 18 i dalej. Uwaga do całej pracy - czy rysunki są autorstwa Doktoranta – jeśli tak to w porządku; jeśli nie - to powinny być odwołania do „*źródeł*” ;
5. Strona 19. Wiersz 13. od dołu – w jaki sposób można przeprowadzić „*optymalizację cech*” ???;
6. Strona 20. Wiersz 7. od dołu- co było/jest funkcją celu w *procesie optymalizacji* ??? Proszę o wyjaśnienie.
7. Strona 68 i dalej - byłoby dobrze podawać źródła „*zapożyczeń* ” wzorów (2.5, 2.6) i dalej ;
8. Strona 114. Wiersz 18. od dołu- Czy wybór *korelacji* miał charakter wyłącznie subiektywny, czy był poprzedzony jakąś analizą formalno-merytoryczną ?????;
9. Strona 188 - P.4.2 - Metodologia ? czy metodyka ? ;
10. Strona 267 i dalej – niektóre pozycje bibliograficzne są „wiekowe” mają ponad 40 lat – czy rzeczywiście nie można byłoby znaleźć nowszych opracowań ???

Przedstawione powyżej uwagi zasadniczo nie obniżają wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy i nie umniejszają osiągnięć Autora. Inne liczne drobne uwagi, przypadki nie stosowania interpunkcji, niejednolicie stosowany zapis poszczególnych rozdziałów/podrozdziałów, potknięcia stylistyczne jak również pewne niejasności zostały pominięte w recenzji na skutek uprzedniego omówienia i wyjaśnienia ich z Doktorantem.

5. Ocena pracy jako rozprawy doktorskiej

Biorąc pod uwagę zawartość pracy stwierdzam, że Doktorant w sposób wystarczająco jednoznaczny sformułował problem naukowy, który następnie rozwiązał właściwie przy użyciu metod naukowych. Zakres i stopień wiedzy Doktoranta w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy praca, jest wystarczający zarówno w zakresie teoretycznym jak również aplikacyjnym. Na szczególną uwagę zasługuje spora wiedza i znajomość zagadnień związanych rachunkiem optymalizacyjnym, modelowaniem i programowaniem komputerowym. Doktorant posiada również dobre opanowanie techniki pisania prac naukowych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Ochmanna pt. *„Analiza cieplno-przepływowa zasobnika ciepła ze złożem porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu”*

spełnia ustawowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich zawarte w art. 13 Ustawy O stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2004r. (Dziennik Ustaw, poz.595, wraz z późn.zm., Dziennik Ustaw z dnia 21.06.2016 r., poz.882) w korespondencji z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 roku w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dziennik Ustaw z dnia 30.01.2018 r., poz.261).

Jest ona oryginalnym rozwiązaniem postawionego przez Autora zagadnienia naukowego. Potwierdza opanowanie przez Niego wiedzy w Dyscyplinie Naukowej *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* w odniesieniu do *Energetyki/Gospodarki energetycznej*. Potwierdza również umiejętność rozwiązywania problemów naukowych, w związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Podpisał Waldemar Kamrat