



Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Warszawa, 15.01.2026

dr hab. inż. Arkadiusz Szczęśniak, prof. uczelni
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Politechnika Warszawska
arkadiusz.szczesniak@pw.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Ochmanna

*"Analiza cieplno – przepływowa zasobnika ciepła ze złożem
porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym
systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu "*

Rozprawa doktorska została zrealizowana w Dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo
i Energetyka Politechniki Śląskiej

Promotor rozprawy dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ

Promotor pomocniczy dr inż. Krzysztof Rusin

1. Podstawa opracowania

Recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Krzysztofa Labusa z dnia 05.12.2025.

2. Ogólna charakterystyka recenzowanej rozprawy

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”* została przygotowana na Politechnice Śląskiej w Dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Barteli, prof. PŚ (promotor) oraz dr inż. Krzysztofa Rusina (promotor pomocniczy). Rozprawa jest osadzona w aktualnym kontekście transformacji energetycznej i rosnącego zapotrzebowania na wielkoskalowe magazyny energii, a jej osią merytoryczną jest adiabatyczny system CAES (A-CAES) sprężony z zasobnikiem ciepła (TES) w postaci złoża porowatego. W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania poeksploatacyjnego szybu górniczego jako rezerwuaru sprężonego powietrza, a jednocześnie przestrzeni zabudowy pełnoskalowego zasobnika TES, co prowadzi do nietypowo dużej smukłości zasobnika – wskazywanej przez autora jako kluczowa luka badawcza.

Zasadniczym celem rozprawy jest opracowanie i zbadanie (eksperymentalnie i numerycznie) zasobnika TES ze złożem porowatym, a następnie wykorzystanie uzyskanych zależności do budowy modelu i oceny potencjału systemu A-CAES. W rozdziale 1.1 sformułowano szczegółowe zadania badawcze obejmujące m.in.: budowę stanowiska laboratoryjnego, kampanię pomiarową dla kilku wariantów geometrii i granulacji złoża, budowę i walidację modelu numerycznego zasobnika, analizę wrażliwości wskaźników oceny, optymalizację konstrukcji TES oraz opracowanie i analizę numeryczną systemu A-CAES bazującego na wcześniejszych wynikach. **Rozprawa była realizowana przy wsparciu projektów finansowanych m.in. przez NCN (PRELUDIUM), RFCS Komisji Europejskiej oraz przy wsparciu Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w ramach programu START 24, co dodatkowo potwierdza aktualność tematyki i jej zgodność z priorytetami krajowych oraz europejskich programów badawczych.**

Praca ma logiczną, etapową strukturę: od przeglądu literatury przedmiotu, zdefiniowania luki badawczej, przez badania laboratoryjne i numeryczne zasobnika TES, optymalizację, aż do modelowania i oceny systemowej A-CAES. Rozprawa doktorska została spisana na 312 stronach (łącznie z częścią wstępną, załącznikami oraz materiałami pomocniczymi). Układ treści obejmuje sześć rozdziałów zasadniczych oraz załączniki, bibliografię i treszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 stanowi wprowadzenie, w którym autor omawia systemy magazynowania energii, w szczególności CAES oraz magazyny ciepła, a także uzasadnia wybór tematyki w kontekście potrzeb systemu elektroenergetycznego. Wprowadzona zostaje koncepcja systemu A-CAES z szybem górniczym jako rezerwuarem sprężonego powietrza, jak również w rozdziale zidentyfikowano potencjał wykorzystania infrastruktury górniczej w Polsce gdzie wskazano 52 czynne lub niezlikwidowane szyby górnicze o wysokim potencjale wykorzystania na potrzeby wielkoskalowego systemu magazynowania energii.

Rozdział 2 przedstawia badania eksperymentalne wykonane na autorskim stanowisku pomiarowym. Zaplanowano i przebadano trzy geometrie zasobnika o różnych wartościach parametru smukłości, przy zachowaniu tej samej objętości złoża ($0,1 \text{ m}^3$), co umożliwia bezpośrednią ocenę wpływu smukłości na parametry pracy zasobnika. Materiał akumulacyjny dobrano na drodze analizy kryterialnej; w badaniach zastosowano kruszone skały bazaltowe o dwóch granulacjach, dla których wyznaczono średnice ekwiwalentne 13,99 mm oraz 18,78 mm. Pomiary obejmowały m.in. temperaturę materiału w 10 punktach wzdłuż osi zasobnika oraz spadek ciśnienia przepływającego powietrza; wskazano także ograniczenia stanowiska (m.in. maks. temperatura wlotowa 110°C oraz dopuszczalny spadek ciśnienia 10 kPa).

Rozdział 3 poświęcono modelowaniu numerycznemu zasobnika TES w środowisku ANSYS Fluent. Autor przedstawia budowę modelu, dyskretyzację i weryfikację niezależności od siatki/kroku czasowego, dobór korelacji wymiany ciepła oraz walidację w oparciu o własne dane eksperymentalne dla wszystkich trzech wariantów zasobnika (zarówno w zakresie temperatur, jak i spadków ciśnienia). Na tej podstawie wykonano analizy wpływu parametrów (smukłość, średnica elementów złoża, strumień masowy, czas etapów cyklu) na sprawność energetyczną i egzergetyczną zasobnika oraz układu magazynowania ciepła.

Rozdział 4 zawiera optymalizację konstrukcji zasobnika TES w skali laboratoryjnej. Autor przyjmuje podejście oparte o metodę płaszczyzny odpowiedzi, a funkcją celu jest maksymalizacja sprawności egzergetycznej zasobnika. Jako zmienne decyzyjne przyjęto m.in. długość zasobnika, średnicę elementów złoża oraz strumień masowy powietrza (w określonych zakresach), zachowując stałą objętość zasobnika, co przekłada się na szeroki zakres możliwych smukłości. W ramach rozdziału przedstawiono również badania wariantu wytypowanego jako optymalny oraz uzupełniającą analizę wymiarową.

Rozdział 5 stanowi zwięźczenie pracy w postaci modelowania i oceny systemu A-CAES. Badany układ obejmuje dwustopniową sprężarkę z chłodzeniem międzystopniowym, rezerwuár sprężonego powietrza (szyb górniczy), zasobnik TES oraz ekspander i generator; w modelu uwzględniono m.in. konieczność dławienia izentalpowego przed ekspanderem wynikającą ze zmian parametrów powietrza w trakcie rozładowywania. Autor analizuje trzy modele numeryczne systemu o różnym stopniu szczegółowości: (I) sprężony model ANSYS Fluent (najdokładniejszy), (II) model Matlab (metodyka Schumanna z rozszerzeniem o wymianę ciepła ze ścianą) oraz (III) model Excel (uproszczony), z wykorzystaniem biblioteki CoolProp do wyznaczania własności termodynamicznych. W części wynikowej pokazano m.in. uzyskiwaną sprawność energetyczną systemu A-CAES (do 67,71% dla przypadku

referencyjnego w podejściu o najwyższej dokładności) oraz analizy wpływu parametrów geometrycznych i ciśnieniowych na produkcję energii.

Rozdział 6 ma charakter podsumowujący i syntetyzuje wnioski z części eksperymentalnej, numerycznej, optymalizacyjnej i systemowej.

Całość uzupełniają załączniki, bibliografia oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

3. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Rozprawę opracowano w układzie przejrzystym i konsekwentnym, odpowiadającym standardom prac doktorskich o profilu badawczo-inżynierskim. Autor prowadzi czytelnika od zarysowania problemu i osadzenia go w kontekście technologii magazynowania energii, poprzez własne badania eksperymentalne oraz analizy numeryczne, aż do etapu optymalizacji i ujęcia systemowego w ramach modelowania A-CAES. Taka sekwencja rozdziałów sprzyja czytelności argumentacji oraz ułatwia śledzenie logiki prowadzonych badań. Na uwagę zasługuje uwzględnienie na początku pracy wykazu ważniejszych symboli i oznaczeń, co w rozprawie o wyrażnie ilościowym charakterze istotnie porządkuje zapis i ogranicza ryzyko niejednoznaczności. Rozdział 1 (Wprowadzenie) pełni funkcję poprawnie zbudowanego rozdziału problemowego: obejmuje cele i zakres pracy oraz syntetyczne omówienie systemów magazynowania energii, technologii sprężonego powietrza i zagadnień magazynowania ciepła.

Trzon rozprawy otwiera Rozdział 2 (Badania eksperymentalne), w którym przedstawiono dobór materiału akumulacyjnego, opis stanowiska i procedur pomiarowych oraz wyniki badań, zakończone podsumowaniem rozdziału. Umieszczenie w pracy obszernej części eksperymentalnej należy ocenić pozytywnie – stanowi ona solidną podstawę do dalszego modelowania i weryfikacji przyjętych założeń.

W Rozdziale 3 (Badania numeryczne) Autor prezentuje model CFD w środowisku ANSYS Fluent, wraz z metodyką oceny układu, zagadnieniami dyskretyzacji (w tym testami niezależności od siatki i kroku czasowego), doborem korelacji oraz walidacją modelu na podstawie wyników eksperymentalnych. Układ tej części jest poprawny: najpierw budowa i weryfikacja narzędzia obliczeniowego, następnie analiza wpływu parametrów na charakterystyki pracy zasobnika.

Kolejny krok stanowi Rozdział 4 (Optymalizacja zasobnika TES w skali laboratoryjnej), gdzie czytelnie wydzielono wybór zmiennych, metodykę, wyniki optymalizacji oraz weryfikację wariantu optymalnego i analizę wymiarową. Z punktu widzenia logiki pracy jest to rozwiązanie trafne: część optymalizacyjna ma własną strukturę i nie rozmywa się w rozdziałach obliczeniowych.

W Rozdziale 5 (Modelowanie systemu A-CAES) Autor przechodzi od skali zasobnika do skali całego systemu, zestawiając podejścia o różnym poziomie szczegółowości, co pozwala ocenić zarówno walory poznawcze, jak i potencjalną użyteczność inżynierską opracowanych modeli.

Rozprawę zamyka Rozdział 6 (Podsumowanie) obejmujący syntezę wyników oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Część końcowa została uzupełniona o elementy wymagane edytorsko i porządkujące: załączniki, bibliografię, spisy rysunków i tabel, streszczenie oraz abstract, co świadczy o kompletności opracowania i dbałości o stronę formalną.

Reasumując, układ rozprawy oceniam pozytywnie: jest logiczny, spójny i wspiera tezę pracy poprzez klarowną progresję od badań własnych, przez walidowane modelowanie, po etap optymalizacji i ujęcie systemowe.

4. Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

W rozprawie wykorzystano obszerną i tematycznie prawidłowo dobraną bazę literaturową, obejmującą łącznie 320 pozycji, co w pełni odpowiada standardom prac doktorskich o profilu eksperymentalno-numerycznym i świadczy o dużej dyscyplinie autora w gromadzeniu oraz porządkowaniu źródeł. Zakres cytowań jest spójny z problematyką pracy i odpowiada jej wielowątkowemu charakterowi (CAES/A-CAES, zasobniki TES ze złożem porowatym, zagadnienia cieplno-przepływowe, modelowanie i walidacja). Wskazuje to na rzetelne rozpoznanie stanu wiedzy oraz właściwe osadzenie własnych badań w kontekście światowych trendów i wyników. Na podkreślenie zasługuje aktualność znacznej części źródeł – w bibliografii znajdują się pozycje z lat 2021–2025, w tym prace opublikowane w renomowanych recenzowanych czasopismach, co jest szczególnie istotne w przypadku prac podejmujących obszary cechujące się dynamicznym rozwojem.

Jednocześnie Autor nie ogranicza się wyłącznie do literatury najnowszej: uwzględnia także klasyczne, fundamentalne pozycje, co pozytywnie świadczy o dojrzałości warsztatu i poprawnym ugruntowaniu aparatu teoretycznego.

W bibliografii widoczna jest również dobra orientacja autora w kontekście aplikacyjnym: uwzględniono raporty, opracowania instytucjonalne i źródła on-line (m.in. dane statystyczne, dokumenty administracyjne i branżowe), a w przypadku materiałów internetowych konsekwentnie podano datę dostępu. Włączenie tego typu pozycji jest zasadne dla uzasadniania tła wdrożeniowego (górnictwo, transformacja energetyczna, uwarunkowania infrastrukturalne), o ile autor dba o ich aktualność i wiarygodność.

Pozytywnie oceniam także, że spis literatury obejmuje źródła dotyczące zarówno technologii CAES i jej wariantów, jak i zagadnień modelowania/analizy sprawności systemów oraz rozwiązań referencyjnych (np. opisy instalacji Huntorf, przeglądy technologii, analizy porównawcze). To wzmacnia wiarygodność części przeglądowej i pozwala poprawnie osadzić wyniki własne na tle stanu wiedzy.

Podsumowując, zastosowane piśmiennictwo oceniam bardzo dobrze: jest obszerne, aktualne, tematycznie trafnie dobrane i obejmuje zarówno podstawy teoretyczne, jak i literaturę najnowszą oraz źródła kontekstowe istotne dla aplikacji w systemach A-CAES.

5. Wskazanie oraz ocena celu pracy kandydata

Cel rozprawy został przez Kandydata sformułowany w sposób jednoznaczny i poprawny merytorycznie. W rozdziale 1.1 „Cele i zakres pracy” autor przedstawia zarówno ogólną orientację pracy, jak i klarownie wypunktowany zestaw zadań badawczych, obejmujący: przygotowanie i uruchomienie stanowiska laboratoryjnego, przeprowadzenie kampanii pomiarowej w układach o zróżnicowanej smukłości i granulacji złoża, opracowanie oraz walidację modelu numerycznego, analizę wrażliwości wskaźników oceny oraz etap optymalizacji konstrukcji zasobnika, a następnie przeniesienie wniosków do modelowania systemu A-CAES. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że w podsumowaniu pracy autor syntetyzuje cel nadrzędny jako szeroką analizę parametrów operacyjnych zasobnika TES ze złożem akumulacyjnym, ze świadomie postawionym akcentem na wykazanie wpływu smukłości zasobnika na efektywność zarówno samego magazynu ciepła, jak i całego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Jednocześnie Kandydat wskazuje bezpośrednie uzasadnienie takiego wyboru – wynikające z koncepcji zabudowy zasobnika w szybie pogórnictwa o ograniczonej średnicy, co prowadzi do nietypowo wysokiej smukłości rozważanego rozwiązania.

Cel pracy oceniam bardzo wysoko: jest on aktualny, jasno umotywowany oraz istotny aplikacyjnie, a przy tym osadzony w realnym ograniczeniu inżynierskim, które determinuje kierunek badań. Warto także zaznaczyć, że Kandydat nie ogranicza się do deklaracji ogólnej, lecz przekłada cel na logiczny i kompletny ciąg działań badawczych (eksperyment, walidacja, badania wielowariantowe, optymalizacja, ocena wpływu na A-CAES). Takie ujęcie zapewnia operacjonalizację celu oraz możliwość jego weryfikacji w oparciu o mierzalne wskaźniki pracy zasobnika i systemu.

6. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

W rozprawie zastosowano spójny i poprawnie dobrany zestaw metod badawczych, obejmujący: (i) badania eksperymentalne w skali laboratoryjnej, (ii) modelowanie numeryczne zasobnika TES oraz (iii) procedury optymalizacji i analizę na poziomie systemowym A-CAES. Taki układ metod należy **ocenić pozytywnie jako zgodny z aktualnymi standardami prowadzenia badań w obszarze magazynowania ciepła i energii.**

W części eksperymentalnej Autor przedstawia stanowisko badawcze i procedury pomiarowe oraz prowadzi wielowariantowe badania zasobników. Na uwagę zasługuje rzetelne podejście do metrologii: opis doboru czujników temperatury (PT100 kl. A) oraz pomiaru spadku ciśnienia (przetwornik różnicy ciśnień Aplisens PR-28), wraz z oszacowaniem niepewności pomiarowych (m.in. maks. niepewność temperatury $\pm 0,36^{\circ}\text{C}$ oraz spadku ciśnienia $\pm 209\text{ Pa}$; s. 67). Takie ujęcie wzmacnia wiarygodność wniosków, bo pozwala odnieść rozrzut wyników do ograniczeń aparatury.

Rdzeniem części numerycznej jest szczegółowy model zasobnika w środowisku CFD, którego konstrukcja została rozszerzona względem podejść podstawowych m.in. o promieniową zmienność porowatości złoża oraz dobór korelacji Nusselta do wyznaczania lokalnego współczynnika wnikania ciepła w kolejnych krokach czasowych symulacji.

Autor poprawnie przeprowadza kluczowe elementy „higieny numerycznej”, tj. test niezależności od siatki i kroku czasowego (Rozdział 3.3.1; s. 135–138), wskazując kompromis pomiędzy kosztem obliczeń a dokładnością (np. wybór siatki o 47 670 węzłach przy bardzo niskich odchyleniach RMSPE rzędu 0,012%–0,042%). Dodatkowo, dobór korelacji wymiany ciepła oparto na porównaniu symulacji z danymi eksperymentalnymi i metryce odchylenia (RMSPE), co jest podejściem merytorycznie uzasadnionym; w szczególności wykazano najkorzystniejszą zgodność dla korelacji Wakao i in. (średnio 2,78% RMSPE; s. 143–144). Istotnym atutem metodyki jest przyjęcie jednoznacznych wskaźników oceny działania zasobnika i układu (sprawności energetyczne i egzergetyczne), wraz z ich formalnymi definicjami i bilansem obejmującym także nakład energetyczny dmuchawy (Rozdział 3.2; s. 132–133). Dzięki temu wyniki analiz parametrycznych są porównywalne, a wnioski osadzone w kryteriach inżynierskich istotnych dla projektowania i eksploatacji.

W kolejnych etapach Autor wykorzystuje metody optymalizacji oparte o metamodel i metodę płaszczyzny odpowiedzi (Rozdział 4, s. 188–195), przyjmując jako funkcję celu maksymalizację sprawności egzergetycznej zasobnika oraz weryfikując punkt optymalny w obliczeniach (m.in. ocena dokładności metamodelu; s. 195–196). Na końcu, w Rozdziale 5 (od s. 209) przeprowadzono modelowanie systemu A-CAES, co stanowi wartościowe domknięcie pracy: od badań elementu (TES) do konsekwencji dla cyklu pracy i parametrów systemowych (np. prezentacja przebiegu spadku ciśnienia w cyklu; s. 229–230).

Podsumowując, zastosowane metody badawcze są adekwatne do celu pracy i wzajemnie się uzupełniają. Za szczególnie wartościowe należy uznać: metrologicznie świadome prowadzenie eksperymentu, konsekwentną walidację modelu CFD oraz oparcie wnioskowania o wskaźniki energetyczno-egzergetyczne. Jako drobną sugestię recenzencką można wskazać, że w części numerycznej przydatne byłoby bardziej syntetyczne zestawienie (w jednym miejscu) przyjętych ustawień solvera i kryteriów zbieżności, aby ułatwić pełną odtwarzalność obliczeń; nie wpływa to jednak na ogólną, **pozytywną ocenę warsztatu badawczego**.

7. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

Omówienie wyników badań zostało w rozprawie poprowadzone w sposób spójny i konsekwentny: od rezultatów eksperymentalnych, poprzez walidowane modelowanie numeryczne, następnie etap optymalizacji, aż do uogólnienia w skali systemowej w modelu A-CAES i finalnej syntezy wniosków. Taka jest czytelna i odpowiada logice celów pracy.

Pozytywnie oceniam fakt, że Autor nie ogranicza się do prezentacji wykresów, lecz w większości przypadków podejmuje rzeczową interpretację obserwowanych trendów. W części eksperymentalnej dyskusja obejmuje zarówno charakterystyki cieplne, jak i opory przepływu, a Autor odnosi otrzymane wyniki do miar błędu oraz wskazuje ograniczenia stanowiska i metodyki, co świadczy o krytycznym podejściu do jakości danych.

W części numerycznej istotnym atutem jest oparcie wnioskowania o walidację modelu CFD względem danych własnych, co wzmacnia wiarygodność analiz parametrycznych i późniejszej optymalizacji. W rozdziale optymalizacyjnym cenne jest również „domknięcie” dyskusji poprzez sprawdzenie zachowania wariantu optymalnego w pracy cyklicznej i wskazanie konsekwencji ciepła rezydualnego dla dochodzenia układu do stanu quasi-powtarzalnego.

Rozdział systemowy stanowi dobre uzupełnienie pracy – Autor pokazuje, jakie skutki projektowe i eksploatacyjne mają wyniki badań zasobnika TES dla pracy A-CAES, w tym dla sprawności energetycznej i egzenergetycznej w kolejnych cyklach.

Jako uwagę recenzencką (niezmieniającą ogólnie dobrej oceny) wskazałbym możliwość bardziej systematycznego porównania wybranych rezultatów z danymi literaturowymi w analogicznych zakresach parametrów oraz wyraźniejszego wydzielenia wpływu kluczowych założeń modelowych na rozbieżności. Mimo tego **omówienie wyników należy uznać za merytoryczne, krytyczne i dobrze uzasadniające wnioski końcowe.**

8. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Uzyskane w rozprawie wyniki mają wyraźny wymiar praktyczny i mogą stanowić bezpośrednią podstawę do projektowania oraz doboru parametrów zasobników ciepła ze złożem porowatym przeznaczonych do współpracy z adiabatycznymi układami CAES. W szczególności, Autor formułuje wnioski o charakterze projektowym, wskazując wpływ kluczowych cech konstrukcyjnych (zwłaszcza geometrii i smukłości zasobnika) oraz parametrów operacyjnych (strumienia masowego powietrza) na rozkłady temperatury w złożu, sprawność procesu ładowania/rozładowania oraz straty przepływowe. Takie ujęcie umożliwia praktyczne balansowanie kompromisu pomiędzy intensyfikacją wymiany ciepła a kosztami eksploatacyjnymi wynikającymi ze spadku ciśnienia, co jest jednym z zasadniczych problemów inżynierskich w projektowaniu zasobników typu packed-bed.

Istotną wartością aplikacyjną jest również oparcie wniosków o walidację modelu CFD na danych własnych, co zwiększa wiarygodność przenoszenia rezultatów na warianty konstrukcyjne nieuwzględnione bezpośrednio w eksperymencie. Dzięki temu opracowane mapy zależności i analizy parametryczne mogą być traktowane jako narzędzie wspomagające prace rozwojowe, w tym wstępny dobór geometrii i parametrów złoża jeszcze przed etapem budowy prototypu. Dodatkowo, zastosowanie optymalizacji z funkcją celu sformułowaną w kategoriach sprawności egzenergetycznej daje wymierne kryterium oceny jakości rozwiązań, odpowiadające potrzebom inżynierskim w obszarze magazynowania energii (minimalizacja nieodwracalności i strat jakości energii). Na praktyczną użyteczność pracy wpływa także analiza pracy cyklicznej wariantu optymalnego, uwzględniająca rolę ciepła rezydualnego i dochodzenia do stanu quasi-powtarzalnego – tj. aspektów kluczowych dla stabilnej eksploatacji i sterowania układem A-CAES w warunkach rzeczywistych. W konsekwencji wyniki rozprawy można uznać za istotne zarówno z perspektywy projektanta zasobnika TES,

jak i integratora systemu A-CAES, a przedstawione rekomendacje mogą zostać wykorzystane w pracach wdrożeniowych oraz dalszych etapach skalowania rozwiązania.

9. Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach

W toku lektury rozprawy **nie stwierdzono nieprawidłowości o charakterze formalnym lub merytorycznym**, które podważałyby poprawność przyjętej metodyki, wiarygodność uzyskanych wyników bądź zasadność sformułowanych wniosków.

Moje uwagi, w przeważającej mierze o charakterze doprecyzowującym, formułuję poniżej w postaci pytań:

1. W rozdziale 3.1.3 wskazano, że czynnikiem roboczym przepływającym przez zasobnik jest powietrze, które w programie ANSYS Fluent zostało opisane równaniem stanu doskonałego. Zbudowany w ten sposób model został zweryfikowany względem danych doświadczalnych, gdzie nadciśnienie („max. dla urządzenia 39 500 Pa”) było generowane przez wentylator. Model wykazał bardzo dobrą zbieżność określoną metryką RMSPE, której wartość nie przekraczała 5%. W rozdziale 5.2 prezentowane są wyniki obliczeń dla układów w dużej skali, gdzie ciśnienie maksymalne osiąga znacznie wyższe wartości, tj. do 4 MPa. Czy model ANSYS opisany w rozdziale 5 również zakłada model powietrza jako model gazu doskonałego? Jaki błąd może generować przyjęcie założenia modelu gazu doskonałego dla powietrza przy ciśnieniu 4,0 MPa?
2. Na stronie 160 zapisano: „Równania (3.48), osiąga wartość od 62,34 W/(m²·K) dla strumienia masowego powietrza równego 0,025 kg/s do 85,47 W/(m²·K) dla strumienia powietrza równego 0,04 W/(m²·K)”, co sugeruje, że sugeruje nieprawidłową jednostkę strumienia masy.
3. Tabela 4.1 wskazuje, że średnica materiału akumulacyjnego Dp, mm = 0,01. Jeśli jednostką jest mm, to 0,01 mm jest skrajnie małe i nie pasuje do reszty pracy.
4. W Tabeli 5.6 Autor przedstawia szacunkowy potencjał adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu z wykorzystaniem infrastruktury pokopalnianej. Następnie Autor doprecyzowuje, że konieczne jest uwzględnienie korka szybowego do zapewnienia szczelności, co wprowadza nieścisłość i rodzi pytanie: Czy orientacyjne dane zestawione w tabeli zostały pomniejszone o objętość korka szybowego?

10. Ocena czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

W mojej ocenie recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, rozumianego jako potrzeba wiarygodnego, ilościowego powiązania konstrukcji i parametrów pracy zasobnika ciepła ze złożem porowatym z jego sprawnością energetyczno-egzergetyczną w warunkach rzeczywistej, cyklicznej eksploatacji

w systemie A-CAES. Oryginalność pracy nie polega jedynie na analizie znanego obiektu (packed-bed TES), lecz na zaproponowaniu i konsekwentnym zrealizowaniu „domkniętej” metodyki badawczej, w której elementy eksperymentu, modelowania CFD oraz optymalizacji konstrukcyjnej tworzą spójny łańcuch wnioskowania, prowadzący do jednoznacznych rekomendacji projektowych. Szczególnie istotne jest, że Autor opiera walidację modeli na danych własnych, uzyskanych na autorskim stanowisku pomiarowym, co pozwala ograniczyć niepewność i zwiększa wartość poznawczą analiz parametrycznych.

Za wkład oryginalny należy uznać również sposób ujęcia zagadnienia optymalizacji, w którym funkcja celu została sformułowana w kategoriach sprawności egzergetycznej, a zmienne decyzyjne odnoszą się zarówno do geometrii (np. smukłości zasobnika), jak i parametrów złoża oraz przepływu, przy zachowaniu narzuconych ograniczeń konstrukcyjnych. Takie podejście wykracza poza typowe porównania wariantów i umożliwia sformalizowane poszukiwanie kompromisu pomiędzy intensyfikacją wymiany ciepła a stratami przepływowymi. Oryginalnym i wartościowym elementem jest także weryfikacja zachowania wariantu optymalnego w pracy cyklicznej, z uwzględnieniem wpływu ciepła rezydualnego i dochodzenia do stanu quasi-powtarzalnego, co ma bezpośrednie przełożenie na praktykę projektowania i eksploatacji magazynów TES sprzężonych z A-CAES. W konsekwencji rozprawa wnosi samodzielny, twórczy wkład do rozwoju metodyki projektowania i oceny zasobników ze złożem porowatym, stanowiąc oryginalne rozwiązanie istotnego problemu badawczego w dyscyplinie.

11. Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie IŚGiE

W mojej ocenie rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Ochmanna w sposób przekonujący potwierdza posiadanie przez Kandydata ogólnej i ugruntowanej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień magazynowania energii w postaci ciepła (TES) oraz integracji zasobników ze złożem porowatym z układami A-CAES. Autor sprawnie porusza się w obszarze klasycznych podstaw termodynamiki i mechaniki płynów, w tym w zakresie bilansowania energii, opisu zjawisk transportu ciepła i masy w ośrodkach porowatych, a także interpretacji wyników w ujęciu egzergetycznym. Na uwagę zasługuje, że rozważania teoretyczne nie mają charakteru wyłącznie przeglądowego, lecz są podporządkowane jasno zdefiniowanemu problemowi badawczemu i konsekwentnie wykorzystywane w kolejnych etapach pracy.

Zastosowany aparat pojęciowy i sposób prowadzenia wywodu wskazują, iż Kandydat rozumie ograniczenia i konsekwencje przyjmowanych założeń modelowych, właściwie dobiera parametry opisujące złoże (m.in. w kontekście strat przepływowych i wymiany ciepła) oraz umiejętnie interpretuje wpływ geometrii zasobnika, warunków brzegowych i reżimu pracy na rozkłady temperatury oraz spadek ciśnienia. Co istotne, Autor potrafi powiązać poziom zjawisk lokalnych, analizowanych metodami CFD, z ujęciem systemowym (A-CAES), co wymaga swobody w przechodzeniu pomiędzy skalą procesu a skalą układu energetycznego.

W efekcie rozprawa prezentuje nie tylko poprawne opanowanie podstaw teoretycznych, lecz także dojrzałość w ich praktycznym zastosowaniu i krytycznej interpretacji, co stanowi istotny wyznacznik kompetencji naukowych w ocenianej dyscyplinie.

11. Ocena wraz z uzasadnieniem, czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej przez osobę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora

Recenzowana rozprawa doktorska wykazuje, w mojej ocenie, wyraźną umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydata. Świadczy o tym przede wszystkim fakt, iż Autor nie ogranicza się do odtwórczego zastosowania znanych narzędzi, lecz konsekwentnie buduje własny, spójny tok badawczy: od jednoznacznego sformułowania problemu inżynierskiego (dobór i ocena geometrii zasobnika TES dla A-CAES), przez zaplanowanie i wykonanie badań eksperymentalnych na stanowisku autorskim, aż po opracowanie i krytyczne wykorzystanie narzędzi modelowania numerycznego oraz optymalizacji. Taka sekwencja działań wymaga nie tylko warsztatu metodycznego, ale także samodzielności w podejmowaniu decyzji badawczych, w tym doboru parametrów, zakresów zmiennych oraz kryteriów oceny.

Na podkreślenie zasługuje również umiejętność integrowania wyników o różnej naturze: Autor potrafi zestawić dane pomiarowe z wynikami CFD, przeprowadzić walidację i wykorzystać ją jako podstawę do wiarygodnych analiz parametrycznych, a następnie przejść do etapu optymalizacji (z jasno zdefiniowaną funkcją celu, m.in. w ujęciu egzergetycznym) i ocenić konsekwencje wyboru wariantu optymalnego w pracy cyklicznej. W całej pracy widoczna jest dojrzałość naukowa w zakresie interpretacji wyników: Kandydat formułuje wnioski w sposób uporządkowany, uzasadnia przyjęte założenia, wskazuje ograniczenia i nie wykracza poza to, co wynika z przeprowadzonych analiz. Powyższe elementy łącznie **pozwalają stwierdzić, że dysertacja potwierdza zdolność Kandydata do samodzielnego planowania**, realizacji i krytycznego podsumowania badań naukowych w dyscyplinie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki.

12. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jakuba Ochmanna pt.: „*Analiza ciepłno-przepływowa zasobnika ciepła ze złożem porowatym przewidzianego do zastosowania w adiabatycznym systemie magazynowania energii w sprężonym powietrzu*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgr inż. Jakuba Ochmanna do publicznej obrony. Ponadto **dysertacja zasługuje na wyróżnienie, o co niniejszym wnioskuję**. Za wyróżnieniem rozprawy przemawiają moim zdaniem następujące przesłanki: po pierwsze, wyjątkowo spójna i kompletna ścieżka badawcza – od autorskich, rzetelnie zaprojektowanych badań

eksperymentalnych, przez modelowanie numeryczne oparte o weryfikację na danych własnych, aż po etap optymalizacji i krytycznej interpretacji rezultatów w ujęciu egzergetycznym. Po drugie, praca wnosi realną wartość aplikacyjną dla adiabatycznych systemów CAES, a wnioski mają charakter nie tylko opisowy, lecz także projektowy (wskazujący konsekwencje konstrukcyjne i eksploatacyjne), przy zachowaniu wysokiego poziomu dojrzałości inżynierskiej, przejrzystości prezentacji oraz dyscypliny w formułowaniu uogólnień.

dr hab. inż. Arkadiusz Szczęśniak, prof. uczelni