

Kraków, 09.01.2026

Prof. dr hab. inż. Wiesław Zima
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Energetyki
al. Jana Pawła II 37
31-864 Kraków

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”

1. Podstawa opracowania

Podstawę do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Ochmanna stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Krzysztofa Labusa (pismo nr RIE-BD.512.52.2025 z 05.12.2025r).

2. Wprowadzenie

Obecnie w Polsce 41 % produkowanej energii pochodzi z węgla kamiennego. Projekt aktualizacji Krajowego Planu w dziedzinie Energii i Klimatu (KPEiK) do 2030 r. z perspektywą do 2040 r. przewiduje, że krajowe zużycie węgla kamiennego energetycznego zostanie obniżone do 22,5 mln t w 2030 r. W tym samym dokumencie jest mowa o zakończeniu krajowej eksploatacji tego węgla najpóźniej do roku 2049. Polskie górnictwo węgla kamiennego stoi więc dziś w obliczu wielkiej i nieuchronnej transformacji. Dużym wyzwaniem będzie jej przeprowadzenie z uwzględnieniem, jak to nazwano w KPEiK „sprawiedliwego wymiaru transformacji regionów węglowych”. Szczegóły tej transformacji zawarto w dwóch umowach społecznych mających na celu zapewnienie procesu wygaszania kopalń z minimalizacją kosztów społecznych. Niestety, „minimalizacja” ta na dzień dzisiejszy to głównie niezagospodarowane nieużytki oraz miejsca o charakterze komercyjnym lub kulturowym. Znane są natomiast inne sposoby wykorzystania infrastruktury górniczej pozwalające, między innymi, na zwiększenie stabilności lokalnego systemu elektroenergetycznego. Powstają liczne opracowania dotyczące elektrowni szczytowo-pompowych oraz systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Należy bezwzględnie wspierać wszelkie działania mające na celu przystosowanie podziemnych wyrobisk i szybów górniczych do ich jak najbardziej efektywnego wykorzystania, w tym jako rezerwuary sprężonego gazu lub dolne zbiorniki wody.

Mając powyższe na względzie, uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Ochmanna jest bardzo aktualna oraz istotna ze względów poznawczych.

3. Zakres rozprawy

Rozprawa zawarta jest na 312 stronach. Składa się z sześciu głównych rozdziałów, poprzedzonych podziękowaniami oraz wykazem oznaczeń i symboli. Uzupełnienie pracy stanowią trzy załączniki, bibliografia obejmująca 320 pozycji, spis rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozprawa powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Barteli, prof. PŚ (promotor) oraz dr inż. Krzysztofa Rusina (promotor pomocniczy).

Część merytoryczną pracy rozpoczyna wprowadzenie, stanowiące jej rozdział pierwszy. Rozpoczyna się on od krótkiej analizy zapisów zawartych w KPEiK, dotyczących, m.in., przebiegu transformacji regionów węglowych. Doktorant wykazał, że koncepcje wykorzystania infrastruktury górniczej jako elementów w systemach magazynowania energii pojawiają się jedynie w publikacjach naukowych. Zagadnienia te od dłuższego czasu podejmowane są także przez pracowników Politechniki Śląskiej, czego wynikiem jest np. patent europejski, którego współautorem jest dr hab. inż. Łukasz Bartela, prof. PŚ. Patent ten obejmuje wykorzystanie poeksploatacyjnego szybu górniczego jako magazynu energii w sprężonym powietrzu. Ponadto, zaplanowano umieszczenie w szybie zasobnika ciepła wypełnionego porowatym złożem akumulacyjnym. Jego zadaniem jest wymiana ciepła z przepływającym powietrzem i stanowi on integralną część adiabatycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Rozwój tych koncepcji stanowił w głównej mierze motywację dla powstania recenzowanej pracy doktorskiej, dla której sformułowano, m.in., następujące cele:

- opracowanie i budowa stanowiska laboratoryjnego,
- przeprowadzenie kompleksowej kampanii pomiarowej,
- budowa modelu numerycznego zasobnika ciepła ze złożem porowatym oraz jego walidacja,
- optymalizacja zasobnika ciepła,
- opracowanie modelu numerycznego adiabatycznego systemu magazynowania energii w sprężonym powietrzu.

W rozdziale tym omówiono także systemy magazynowania energii i ciepła. Wśród układów magazynowania ciepła omówiono systemy magazynujące ciepło jawne i ciepło utajone. Omawiając systemy magazynowania energii w sprężonym powietrzu szczegółowej analizie poddano koncepcje układu adiabatycznego, adiabatycznego oraz izotermicznego. Opisy tych koncepcji poparto licznymi przykładami. W dalszej części rozdziału 1 wskazano regiony górnicze w Polsce, w których znajdują się szyby o wysokim potencjale wykorzystania na potrzeby magazynowania energii. Wskazano także na istotne nakłady finansowe związane z likwidacją kopalń węgla kamiennego. Zdaniem Doktoranta, części tych nakładów można uniknąć, a zaoszczędzone środki przeznaczyć na prace związane z przystosowaniem szybów do pełnienia funkcji rezerwuarów sprężonego powietrza.

Biorąc pod uwagę, że na proces odchodzenia od węgla kamiennego i łagodzenia skutków tego procesu dla sektora górniczego przewiduje się wydatkowanie ok. 110 mld zł, powyższa uwaga o możliwości przeznaczenia części tej kwoty na w/w prace przygotowawcze szybów jest bardzo cenna. Pozostaje jedynie problem przekonania do tego pomysłu odpowiednich osób.

Rozdział 2 poświęcony jest badaniom eksperymentalnym. Jest to bardzo istotny rozdział rozprawy. Koncepcja stanowiska badawczego poprzedzona została szerokim przeglądem dotychczasowych badań eksperymentalnych z zakresu magazynowania ciepła i/lub chłodu w zasobnikach wypełnionych złożem porowatym. Wyniki tego przeglądu zestawiono tabelarycznie. W oparciu o ten przegląd zdefiniowano lukę badawczą obejmującą wykorzystanie zasobników ciepła o wartości parametru smukłości powyżej 8 oraz przeprowadzanie badań w oparciu o kilka geometrii zasobnika ciepła. Na tej podstawie zaplanowano badania eksperymentalne trzech geometrii zasobnika o tej samej objętości, lecz o różnej wartości parametru smukłości. Celem badań było wykazanie wpływu smukłości zasobnika oraz średnicy ekwiwalentnej elementów złoża akumulacyjnego na uzyskiwane parametry operacyjne. Wybrane parametry badanych eksperymentalnie zasobników ciepła zestawiono tabelarycznie jako warianty I, II oraz III. W dalszej części rozdziału dokonano wyboru materiału akumulacyjnego w formie złoża porowatego. Materiał ten dobrano w oparciu o trzy kryteria: temperaturowe, parametrów termofizycznych oraz ekonomiczne, przyjmując dla każdego kryterium skalę punktową. Ocenie poddano pięć materiałów. Wyniki oceny kryterialnej zestawiono tabelarycznie. Na jej podstawie zdecydowano, że materiałem akumulacyjnym wykorzystanym w badaniach eksperymentalnych będzie grys bazaltowy.

Następnie zaprojektowano i zbudowano modułowe stanowisko badawcze. Jego wizualizację oraz podstawowe komponenty przedstawiono graficznie. Komponenty te, czujniki pomiarowe temperatury i ciśnienia oraz błędy pomiarowe zostały szczegółowo opisane/zwizualizowane. Zestawiono wzory pozwalające na oszacowanie wartości spadku ciśnienia gazu przepływającego przez zasobnik ciepła.

Na potrzeby ewaluacji wyników zdefiniowano kilka bezwymiarowych parametrów opisujących, m.in., stopień naładowania zasobnika, temperaturę powierza wlotowego i wylotowego z zasobnika, czasy etapów ładowania, magazynowania i rozładowywania, czy też parametr straty wylotowej.

Zilustrowano i szczegółowo omówiono typowe charakterystyki, m.in., temperatury materiału akumulacyjnego w czasie etapu ładowania oraz temperatury powietrza podczas etapu ładowania i rozładowania. To samo dotyczy straty wylotowej w funkcji stopnia naładowania zasobnika oraz czasów osiągnięcia kolejnych poziomów stopnia jego naładowania w funkcji strumienia masy powietrza w czasie etapu ładowania dla poszczególnych wariantów. W celu opisanego eksperymentalnego rozkładu temperatury materiału skalnego wzdłuż osi badanych zasobników ciepła i ich porównania wykorzystano pojęcie termokliny. Podkreślono, że dotychczasowe analizy termoklin w zasobnikach ciepła ze złożem akumulacyjnym przeprowadzane były głównie numerycznie. Wprowadzono bezwymiarowe parametry długości termokliny oraz stref maksymalnej i minimalnej temperatury pozwalające analizować np. wpływ smukłości zasobnika ciepła na zmianę długości poszczególnych stref. Zilustrowano i omówiono wpływ strumienia masy powietrza na długość termokliny w czasie etapu ładowania zasobnika w wariantach I, II i III.

Eksperymentalnie wyznaczono także wartości spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez złoża akumulacyjne w zależności od strumienia masy powietrza, badanego wariantu zasobnika i złoża charakteryzującego się określoną średnicą ekwiwalentną elementów. Podobnie jak wyżej, uzyskane wyniki także zestawiono graficznie i szczegółowo omówiono. Ponadto otrzymane wyniki eksperymentalne w zakresie spadku ciśnienia powietrza zestawiono z korelacjami na współczynniki tarcia. Analizie poddano także wartości tego spadku w funkcji stopnia naładowania. Rozdział 2 zakończono podsumowaniem.

Rozdział 3 zatytułowany „Badania numeryczne” rozpoczęto krótkim przeglądem literatury. Na tej podstawie zdefiniowano cel rozdziału, którym było opracowanie modeli numerycznych w środowisku ANSYS Fluent oraz ich walidacja dla wszystkich trzech badanych wariantów zasobnika ciepła. Opisano przyjęte założenia oraz warunki brzegowe, które także zwizualizowano. Przytoczono równania opisujące modelowanie złoża skalnego oraz wymianę ciepła pomiędzy tym złożem i płynem. W celu uzyskania stabilności obliczeń wykorzystano algorytm PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). Obszar złoża akumulacyjnego przyjęto jako izotropowy we wszystkich kierunkach. W realizowanych badaniach numerycznych jako płyn roboczy przepływający przez zasobnik ciepła przyjęto powietrze, które modelowano jako gaz doskonały. Zapisano równania opisujące właściwości termofizyczne powietrza, bazaltu oraz stali nierdzewnej. W dalszej części zdefiniowano wskaźniki oceny układu (m.in. sprawność energetyczną i egzergetyczną zasobnika ciepła) oraz zakres badań. W zakresie dyskretyzacji domeny obliczeniowej przeprowadzono test niezależności wyników od siatki numerycznej i kroku czasowego. W tym celu testom poddano 8 siatek numerycznych wygenerowanych dla tej samej domeny obliczeniowej. Po szczegółowej analizie wyników do dalszych obliczeń numerycznych wybrano jedną z nich oraz oszacowano krok czasowy symulacji. W dalszej części rozdziału przeprowadzono analizę, której celem był wybór takiej korelacji na liczbę Nusselta, dla której wyniki obliczeń numerycznych wykazywałyby akceptowalną zgodność z wynikami eksperymentów. Na podstawie literatury wytypowano trzy takie korelacje. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej do dalszych badań wybrano korelację zaproponowaną przez Wakao i innych. Wyniki numeryczne otrzymane za jej pomocą uzyskały najwyższą zgodność z referencyjnymi wynikami eksperymentalnymi.

Następnie przeprowadzono właściwą walidację modelu numerycznego w oparciu o wyniki eksperymentalne. W tym celu zestawiono 6 serii pomiarowych wykorzystanych do walidacji. Na rys. 3.8-3.19 przedstawiono porównania wyników uzyskanych na drodze numerycznej i eksperymentalnej dla wszystkich trzech wariantów oraz różnych wartości średnic ekwiwalentnych kamieni bazaltowych, strumieni masy powietrza oraz maksymalnej temperatury powietrza wlotowego. Dla wszystkich analizowanych serii pomiarowych zaobserwowano, że mierzona wartość spadku ciśnienia powietrza jest wyższa od wartości obliczeniowych, co odpowiednio skomentowano. Na podstawie procesu walidacji modelu numerycznego potwierdzono, że cechuje się on akceptowalną dokładnością predykcji zmian temperatury materiału akumulacyjnego oraz wartości spadku ciśnienia powietrza.

Jako wykorzystanie opracowanego modelu przedstawiono następnie wyniki analizy cieplno-przepływowej dla wszystkich trzech wariantów zasobnika. Obejmowały one, m.in., rozkłady temperatury materiału akumulacyjnego uzyskane w czasie etapów ładowania i rozładowywania zasobnika. Przedstawiono zmiany wartości bezwymiarowych objętości stref w czasie etapu ładowania dla wszystkich badanych wariantów zasobnika ciepła. Analizie poddano wpływ strumienia masy powietrza na wartość bezwymiarowej objętości strefy termokliny. Potwierdzono obserwacje eksperymentalne w zakresie braku możliwości zapewnienia stałej temperatury powietrza wylotowego z zasobnika ciepła w czasie etapu rozładowywania. Wraz ze wzrostem smukłości zasobnika ciepła zaobserwowano znaczny przyrost wartości spadku ciśnienia powietrza. Zestawiono wartości sprawności energetycznej i egzergetycznej cyklu pracy układu magazynowania energii. Analizie poddano także rozkłady temperatury materiału akumulacyjnego wzdłuż osi symetrii zasobników w zależności od długości etapu magazynowania ciepła. Zbadano wpływ średnicy elementów złoża skalnego na parametry operacyjne zasobników ciepła charakteryzujących się

różnymi współczynnikami smukłości. Potwierdzono numerycznie wnioski dostępne w literaturze mówiące o tym, że wraz ze wzrostem średnicy elementów materiału akumulacyjnego spada potencjał temperaturowy ciepła w obiegu z zasobnikiem ciepła. Wyżej wymienione wyniki i spostrzeżenia wyczerpująco skomentowano. Rozdział zakończono podsumowaniem.

Kolejny rozdział (czwarty) poświęcono optymalizacji zasobnika ciepła w skali laboratoryjnej. W tym celu zdefiniowano zmienne parametry wejściowe i stałe optymalizacji. Zdefiniowano parametry zmienne w postaci długości zasobnika, średnicy elementów złoża oraz strumienia masy powietrza w czasie etapu ładowania i rozładowywania. W celu określenia wpływu poszczególnych parametrów wejściowych na sprawność badanych konfiguracji układów z zasobnikiem ciepła wykorzystano metodę płaszczyzny odpowiedzi. W procesie optymalizacji wykorzystano oprogramowanie ANSYS. Cykl działania zasobnika podzielono na trzy etapy, a funkcją celu była maksymalizacja sprawności energetycznej zasobnika. Wyniki optymalizacji opracowano na podstawie 61 przesiewowych serii numerycznych. Wpływ w/w parametrów zmiennych (w różnych konfiguracjach) na sprawność energetyczną i energetyczną zasobnika oraz cyklu pracy układu zilustrowano graficznie i poddano analizie. Na podstawie tych analiz wytypowano parametry składające się na wariant optymalny zasobnika, dla którego przeprowadzono badania w cyklicznym planie eksploatacji. W ramach jednego cyklu pracy zasobnika przewidziano etapy ładowania, magazynowania, rozładowywania oraz dodatkowy etap spoczynkowy występujący pomiędzy rozładowywaniem, a ładowaniem zasobnika w kolejnym cyklu. Proces ten pozwolił na otrzymanie charakterystyk pracy układu dla szerokiego zakresu jego kluczowych parametrów. W dalszej części tego rozdziału opracowano koncepcję analizy wymiarowej. Podstawą do jej opracowania było dążenie do wyznaczenia uniwersalnego wyrażenia umożliwiającego wskazanie czasu etapu ładowania, w którym dany zasobnik pracował będzie bez nadmiernego wzrostu straty wylotowej. Pod uwagę brano wyniki eksperymentalne dla wszystkich badanych wariantów zasobnika ciepła oraz badania numeryczne. Opracowano funkcję pozwalającą na szacowanie stopnia naładowania zasobnika ciepła w czasie etapu jego ładowania. Przyjęto charakterystyczny dla zasobnika czas, w którym stopień jego naładowania osiąga wartość 0,70. Wartość tę wytypowano na podstawie wniosków z wcześniejszych badań. Po jej przekroczeniu obserwowany jest intensywny wzrost temperatury powietrza na wylocie z zasobnika ciepła. Świadczy to o wyczerpywaniu się zdolności akumulacyjnych złoża. Przedstawiono przykładowe przebiegi wartości stopnia naładowania zasobnika otrzymane za pomocą obliczeń numerycznych oraz na podstawie pomiarów. Przebiegi te zestawiono z przebiegami uzyskanymi za pomocą dopasowanych (opracowanych) funkcji.

W rozdziale 5 przedstawiono zagadnienia związane z modelowaniem adiabatycznych systemów magazynowania energii w sprężonym powietrzu. Na podstawie przeglądu literatury w tym zakresie zdecydowano się na opracowanie trzech modeli różniących się stopniem dokładności. Model I o najwyższym stopniu dokładności opracowano w programie ANSYS, Model II w programie Matlab, natomiast Model III o najniższym stopniu dokładności w programie Excel. Zestawiono równania opisujące parametry maszyn przepływowych występujących w analizowanym systemie. Przedstawiono tabelarycznie założenia do obliczeń. Następnie przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą opracowanych modeli. W przypadku Modelu I były to, m.in., rozkłady temperatury materiału skalnego w zasobniku uzyskane dla etapu ładowania systemu, zmiana stopnia naładowania zasobnika w trakcie cyklicznej pracy systemu, spadek ciśnienia powietrza przepływającego przez zasobnik, moc maszyn przepływowych oraz konsumpcja i produkcja energii elektrycznej w czasie cyklu działania systemu. Model II dotyczył cylindrycznego zasobnika ciepła ze złożem akumulacyjnym. Model ten

oparto na koncepcji jednowymiarowego rozkładu temperatury materiału akumulacyjnego wzdłuż osi zasobnika. Jako wyniki otrzymane za jego pomocą zilustrowano np. rozkłady temperatury złoża akumulacyjnego w czasie etapu ładowania systemu. Wybrane przebiegi temperatury porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą Modelu I. Model III analizowanego adiabatycznego systemu bazował, zwłaszcza w zakresie modelowania zasobnika ciepła, na zależnościach wyznaczonych na drodze opracowania wyników eksperymentalnych i numerycznych. Jako wyniki otrzymane za jego pomocą pokazano wartości, m.in., produkcji energii elektrycznej przez system w zależności od maksymalnego ciśnienia powietrza oraz w zależności od głębokości wykorzystanego szybu górniczego. Zilustrowano także wartości spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez zasobnik w czasie etapu ładowania i rozładowywania w zależności od jego średnicy. Wyniki uzyskane za pomocą wszystkich trzech modeli zostały skomentowane w sposób wyczerpujący.

Rozdział 6 zawiera podsumowanie pracy oraz wskazanie kierunków dalszych badań. Dołączone do pracy trzy załączniki zawierają, odpowiednio, przykład obliczeniowy eksperymentalnego stopnia naładowania zasobnika ciepła, wyznaczenie maksymalnej niepewności pomiaru typu B spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez zasobnik oraz wyprowadzenie zależności umożliwiającej obliczenie parametru $\tau_{0,70}$.

4. Uwagi krytyczne oraz dyskusyjne do pracy

- 1) Zazwyczaj w oparciu o założony cel/cele rozprawy doktorskiej formułowana jest jej teza/tezy. Cele niniejszej pracy zostały sformułowane, brak natomiast tez, których słuszność zostałaby udowodniona. Biorąc pod uwagę zakres rozprawy, podanie tez i ich udowodnienie nie stanowiłoby problemu.
- 2) Pierwszy akapit rozdziału 2 zawiera zdanie w którym jest mowa o tym, że „Realizacja budowy zasobnika ciepła w obrębie szybu górniczego determinowałaby konieczność eksploatacji szczególnie smukłego zasobnika, którego przekrój poprzeczny zostałby ograniczony przez średnicę szybu górniczego oraz konieczność zapewnienia dostępu serwisowych.” Wymaga to dodatkowego komentarza, ponieważ docelowo szyb górniczy ma być miejscem instalacji zasobnika ciepła. Cytowane zdanie wprowadza natomiast w tym zakresie pewną wątpliwość.
- 3) W zdefiniowanej luce badawczej jest mowa o braku badań przeprowadzanych dla parametru smukłości powyżej 8. W ramach rozprawy badaniom poddano trzy warianty zasobnika, z których tylko jeden miał wartość tego parametru powyżej 8. Dlaczego tylko jeden? Wymaga to dodatkowego wyjaśnienia.
- 4) Dlaczego w wariantcie I zdecydowano się na tak dużą smukłość zasobnika? Smukłość w wariantach II i III wyjaśniono.
- 5) Którego wariantu dotyczy rys. 2.15? Można się tylko domyślać, że podobnie jak rys. 2.16 dotyczy wariantu 3.
- 6) Czy na podstawie przebiegu stopnia naładowania zasobnika ciepła (rys. 2.17, 4.11, 4.12) można wyznaczyć dla niego stałą czasową? Jej wartość byłaby bliska wartości $\tau_{0,70}$ (rozdział 4.5) i odpowiadałaby czasowi akumulacji.
- 7) Długości odcinków wlotowych i wylotowych przyjęto w procesie modelowania takie same dla każdego wariantu (rozdział 3.1). Na jakiej podstawie założono te długości równe 20 cm?
- 8) Opisując zakres badań numerycznych (rozdział 3.2) podano, że „Obliczenia realizowane były przy założeniu adiabatycznych ścian zewnętrznych zasobnika ...”. Jak się to ma do warunków

brzegowych opisanych na str. 119-120, gdzie zapisano, że „Warunek brzegowy dla ściany zewnętrznej zasobnika ciepła (Rysunek 3.2) zakładał wymianę ciepła z otoczeniem na drodze konwekcji naturalnej.”?

5. Uwagi redakcyjne

- 1) Niektóre opisy istniejących instalacji, np. w rozdziale 1, są moim zdaniem zbyt szczegółowe.
- 2) Brak na niektórych rysunkach/schematach opisów ich elementów składowych. Ułatwiłoby to analizę tych rysunków/schematów bez konieczności szukania opisów w tekście. Dotyczy to np. rys. 1.4, 2.6.
- 3) W rozdziale 1 występują, m.in., podrozdział 1.2 zatytułowany *Systemy magazynowania energii* oraz podrozdział 1.3 zatytułowany *Systemy magazynowania energii w sprężonym powietrzu*. Wydaje się, że tekst podrozdziału 1.3 powinien zawierać się w podrozdziale 1.2.
- 4) Strona 65, wiersz 4 od dołu; zamiast „przy pomocy ...” powinno być „za pomocą ...”
- 5) Na rys. 2.12-2.13 skrajne wartości średnic ekwiwalentnych należą do dwóch przedziałów, a powinny należeć do jednego. Na tych samych rysunkach przecinki pomiędzy wartościami danego zakresu (na osi odciętych) są nieco mylące. Lepszy byłby np. myślnik.
- 6) W podpisie rys. 2.17 widnieje „...wartość straty wylotowej ...”, podczas gdy rysunek tej straty nie przedstawia.
- 7) Strona 116, wiersz 18 od dołu; Zdanie zaczynające się od słów „W niniejszej publikacji ...” sugeruje recenzowaną pracę doktorską. Dotyczy natomiast pozycji [258] literatury.
- 8) Podawanie jednej wartości średnicy dla danego zasobnika ciepła ułatwiłoby analizę pracy. Na przykład dla zasobnika z wariantu I podawana jest średnica DN200 lub 0,213 m lub 213 mm.
- 9) W rozdziale 3.4 jest mowa o ładowaniu i rozładowywaniu ciepła. Powinno być raczej ładowanie i rozładowywanie zasobnika ciepła.
- 10) W podpisie rys. 4.12 (str. 207) zamiast „linia zielona – wyniki numeryczne” powinno być „linia zielona – wyniki eksperymentalne”.
- 11) Strona 263, wiersz 3-4 od góry; zamiast „... spadku ciśnienia przepływającego przez zasobnik ciepła. ...” powinno być „... spadku ciśnienia powietrza przepływającego przez zasobnik ciepła. ...”

6. Ocena rozprawy

Moim zdaniem tematyka pracy jest bardzo aktualna i interesująca. Rozprawa zawiera oryginalne wyniki badań i analiz. Na uwagę zasługuje ich kompleksowy charakter.

Za główne osiągnięcia Autora recenzowanej pracy uważam:

- 1) Znalezienie luki badawczej wpisującej się w czekającą (częściowo już trwającą) transformację polskiego górnictwa węgla kamiennego.
- 2) Opracowanie koncepcji i zbudowanie modułowego stanowiska badawczego obejmującego trzy geometrie zasobnika ciepła (trzy warianty).
- 3) Przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych wszystkich trzech wariantów.

- 4) Opracowanie w środowisku ANSYS Fluent modeli numerycznych wszystkich trzech badanych wariantów zasobnika ciepła oraz ich walidacja.
- 5) Wskazanie, na podstawie optymalizacji zasobnika ciepła w skali laboratoryjnej, parametrów składających się na wariant optymalny zasobnika oraz przeprowadzenie jego badań.
- 6) Opracowanie trzech kolejnych modeli obejmujących adiabatyczny system magazynowania energii.

Pod względem formalnym praca nie nasuwa wątpliwości. Napisana jest z dużą dbałością o poprawność językową z dobrze dobranym materiałem ilustracyjnym.

7. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że odnoszące się do rozprawy uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie umniejszają wartości naukowej pracy, którą oceniam wysoko. Oceniana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Cele naukowe pracy zostały osiągnięte. Na podstawie przedstawionej do oceny pracy stwierdzam, że Doktorant wykazał się opanowaniem złożonych podstaw teoretycznych dotyczących analizowanych w pracy zagadnień, znajomością aktualnego stanu osiągnięć, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych i numerycznych oraz formułowania wniosków.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana 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 z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, Poz. 1571).

Biorąc powyższe pod uwagę, stawiam wniosek do Rady Dyscypliny *Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka* Politechniki Śląskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Ochmanna do publicznej obrony. Wnioskuje także o jej wyróżnienie, które uzasadniam wysokim poziomem merytorycznym oraz przeprowadzeniem przez Doktoranta oryginalnych badań eksperymentalnych i numerycznych, mających duże znaczenie nie tylko w skali kraju. Potwierdzeniem istotności tych badań jest pięć publikacji w renomowanych czasopismach (*Journal of Energy Storage*, *Energies* oraz *Energy*), których Doktorant jest współautorem.

Podpisał Wiesław Zima