

Imię i nazwisko recenzenta:

dr hab. inż. Dawid Myszka, prof. PW

Politechnika Warszawska

Instytut Technik Wytwarzania

ul. Narbutta 85

02-524 Warszawa

Warszawa, 28.10.2025r.

DATA WPŁYWU

01-12-2025

**Rada Dyscypliny Naukowej
Inżynieria Mechaniczna**

Recenzja pracy doktorskiej

Natalia Łobacz-Raźny

Tytuł rozprawy: *Development of Cast Heat Enhancers for Corrosive PCM-Based Energy Storage System*

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Napłocha,

Promotor pomocniczy: dr-Ing. Carsten Blawert

1. Podstawa opracowania

Recenzja została sporządzona na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej z dnia 18 czerwca 2025r. – sygnatura W10/RDND07/140/2025. Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.). Celem recenzji jest ocena merytoryczna i formalna przedstawionej rozprawy, ze szczególnym uwzględnieniem trzech elementów:

1. Czy rozprawa dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna,
2. Czy wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
3. Czy zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

2.1. Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny pt. *Development of Cast Heat Enhancers for Corrosive PCM-Based Energy Storage System* wpisuje się w niezwykle aktualną i dynamicznie rozwijającą się problematykę związaną z magazynowaniem energii cieplnej, stanowiącą jeden z kluczowych elementów transformacji energetycznej oraz rozwoju odnawialnych źródeł energii. W obliczu rosnącego zapotrzebowania na efektywne systemy akumulacji ciepła szczególnie istotne staje się poszukiwanie rozwiązań pozwalających na zwiększenie wydajności materiałów zmiennofazowych (PCM), które – mimo wysokiej entalpii przemiany fazowej – cechują się niską przewodnością cieplną i znaczną korozyjnością. Praca doktorska podejmuje ten złożony problem w sposób interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia inżynierii mechanicznej, materiałowej, technologii odlewnictwa, modelowania numerycznego oraz inżynierii powierzchni. Autorka zaproponowała i przeanalizowała koncepcję odlewanych wkładek cieplnych (tzw. heat enhancers), których zadaniem jest zwiększenie przewodności cieplnej w systemach TES (Thermal Energy Storage) bazujących na korozyjnych PCM, a następnie podjęła próbę ich ochrony przed degradacją za pomocą powłok wytwarzanych metodą plazmowego utleniania elektrolitycznego (PEO).

Zakres rozprawy obejmuje zarówno przegląd literatury światowej dotyczącej metod magazynowania energii cieplnej, analizy właściwości materiałów i metod poprawy przewodnictwa cieplnego PCM, jak również część badawczą, w której przeprowadzono:

- modelowanie numeryczne z wykorzystaniem oprogramowania FLOW-3D w celu oceny efektywności różnych geometrii przestrzennych,
- eksperymentalne próby odlewania cienkościennych struktur ze stopów aluminium,
- badania skuteczności powłok PEO w środowisku soli hydratowych.

Już na etapie wprowadzenia do pracy można podkreślić, że Autorka sformułowała ambitny program badawczy, a jego realizacja ma nie tylko wymiar poznawczy, lecz także wyraźny potencjał aplikacyjny.

2.2. Dobór i wykorzystanie źródeł literaturowych

Przegląd literatury zawarty w rozprawie został przeprowadzony w sposób bardzo rzetelny i wszechstronny. Autorka odwołała się do ponad 150 pozycji, obejmujących zarówno klasyczne opracowania teoretyczne, jak i najnowsze publikacje naukowe z ostatnich lat, w tym artykuły z czasopism o wysokim współczynniku IF, normy techniczne oraz raporty branżowe. Dobór źródeł świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktorantki w aktualnym stanie wiedzy i w dynamicznie rozwijającej się tematyce magazynowania energii cieplnej.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, iż literatura została nie tylko zebrana, ale również poddana krytycznej analizie. Autorka umiejętnie zestawiała różne kierunki badań nad materiałami zmiennofazowymi, metodami zwiększania przewodnictwa cieplnego oraz technikami zabezpieczeń antykorozyjnych, wskazując zarówno ich potencjał, jak i ograniczenia. Dzięki temu przegląd nie ma charakteru jedynie opisowego, lecz pełni rolę uzasadnienia dla przyjętych założeń badawczych.

Cenne jest także włączenie do analizy najnowszych trendów, takich jak wykorzystanie struktur biomimetycznych w konstrukcji wkładek cieplnych czy zastosowanie powłok plazmowego utleniania elektrolitycznego w środowisku korozyjnych PCM. Przegląd literatury nie ogranicza się zatem do ogólnego tła, ale stanowi solidną podstawę do formułowania tez i celów rozprawy.

Część literaturowa została przygotowana na bardzo wysokim poziomie i świadczy o dojrzałości naukowej Autorki oraz o jej umiejętności krytycznej analizy i syntezy wiedzy z różnych obszarów inżynierii mechanicznej i materiałowej.

2.3. Tezy badawcze

W rozprawie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny sformułowano jasne i spójne tezy badawcze, wynikające bezpośrednio z analizy stanu wiedzy oraz zidentyfikowanych luk badawczych. Mają one charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia inżynierii materiałowej, mechanicznej, technologii odlewnictwa oraz inżynierii powierzchni.

Głównym założeniem Autorki było wykazanie, że poprzez odpowiednie zaprojektowanie cienkościennych struktur odlewanych, ich prawidłową weryfikację numeryczną oraz zastosowanie powłok ochronnych PEO można znacząco poprawić właściwości użytkowe systemów magazynowania energii cieplnej opartych na materiałach zmiennofazowych (PCM). Sformułowane tezy obejmują w szczególności:

1. Optymalizację kształtu geometrycznego wkładek cieplnych – rozbudowane struktury biomimetyczne (m.in. typu „snowflake” czy „drzewko”) prowadzą do istotnej poprawy transferu ciepła w złożach PCM, skracając czas ładowania i zmniejszając gradient temperatury.
2. Dobór odpowiedniego stopu aluminium i parametrów technologii odlewniczej – pozwala na wykonanie cienkościennych, lekkich i jednocześnie stabilnych wymienników ciepła o wysokiej przewodności cieplnej, przy akceptowalnym poziomie wad odlewniczych.
3. Zastosowanie powłok plazmowego utleniania elektrolitycznego (PEO) – skutecznie chroni powierzchnię aluminiowych wkładek przed degradacją w agresywnym środowisku soli hydratowych, nie pogarszając jednocześnie przewodnictwa cieplnego całego układu TES.

Tezy te zostały poprawnie zdefiniowane, znajdują swoje pełne uzasadnienie w przeglądzie literatury i wynikach własnych badań Autorki, a także mają istotny wymiar poznawczy i aplikacyjny. Należy

podkreślić, że wyraźnie odzwierciedlają one innowacyjność podejścia badawczego, stanowiąc zarazem ramy spójnego programu eksperymentalnego i numerycznego.

2.4. Plan badań

Plan badań przedstawiony w rozprawie został opracowany w sposób logiczny, przemyślany i w pełni odpowiada przyjętym tezom badawczym. Poszczególne etapy zostały zaplanowane w taki sposób, aby tworzyć spójną całość, w której wyniki wcześniejszych prac stanowią podstawę do realizacji kolejnych. Program badawczy obejmował trzy główne bloki: analizy numeryczne, badania technologiczne odlewów cienkościennych oraz ochrona antykorozyjna i walidacja funkcjonalna.

Analizy numeryczne (CFD) – w pierwszym etapie Autorka przeprowadziła symulacje komputerowe w programie FLOW-3D, mające na celu ocenę wpływu geometrii biomimetycznych wkładek cieplnych na efektywność transferu ciepła w systemach TES. Testowano różne warianty źródeł ciepła (od środka, od dna oraz z zewnątrz), analizując przebiegi topnienia PCM, dynamikę ładowania oraz gradienty temperatur.

Badania technologiczne odlewów cienkościennych – kolejny etap dotyczył praktycznej weryfikacji możliwości wykonania zaproponowanych struktur metodą odlewania precyzyjnego. Zastosowano różne stopy aluminium (AlSi12, AlSi7, AlMg3), oceniając jakość odlewów pod kątem odwzorowania detali, występowania wad oraz powtarzalności wyników.

Ochrona antykorozyjna i walidacja funkcjonalna – w ostatnim bloku badań skupiono się na wytworzeniu i ocenie powłok ochronnych otrzymanych metodą plazmowego utleniania elektrolitycznego (PEO). Testy prowadzono w środowisku silnie korozyjnych PCM (m.in. hydrat $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) oraz w warunkach cyklicznego ładowania i rozładowywania akumulatora cieplnego. Badano stabilność powłok, ich wpływ na masę próbek, skład fazowy i mikrostrukturę, a także wpływ na przebieg procesów akumulacji i oddawania ciepła.

Tak zdefiniowany plan badań cechuje się dużą przejrzystością i wewnętrzną spójnością. Widać w nim konsekwencję w przechodzeniu od analiz teoretycznych i symulacyjnych, poprzez weryfikację technologii wykonania elementów, aż po ocenę ich trwałości i przydatności praktycznej. Zastosowane podejście wskazuje na wysoki poziom przygotowania metodologicznego Doktorantki oraz umiejętność łączenia różnych metod badawczych w celu kompleksowego rozwiązania postawionego problemu.

2.5. Zastosowana metodyka badań

Metodyka badań przyjęta w rozprawie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny ma charakter kompleksowy i interdyscyplinarny, co należy uznać za jej istotny atut. Autorka w sposób umiemytny połączyła analizy numeryczne, badania eksperymentalne w skali laboratoryjnej oraz specjalistyczne techniki materiałowe i powierzchniowe, tworząc spójny i rzetelny program badawczy.

W części symulacyjnej zastosowano oprogramowanie FLOW-3D, pozwalające na szczegółowe modelowanie zjawisk transportu ciepła i przemian fazowych w materiałach PCM. Dzięki tej metodzie dokonano analizy wpływu geometrii przestrzennych wkładek na szybkość ładowania i rozładowywania akumulatora cieplnego oraz na rozkład temperatur w złożu.

W części technologicznej wykorzystano technikę odlewania precyzyjnego do wykonania cienkościennych struktur o złożonej geometrii. Autorka posłużyła się modelami przygotowanymi metodą FDM (Fused Deposition Modelling), co umożliwiło uzyskanie wymaganej dokładności odwzorowania. Parametry procesu zostały dobrane eksperymentalnie, a jakość odlewów oceniono pod kątem odwzorowania szczegółów, obecności skurczów i stabilności wymiarowej.

W obszarze badań ochrony antykorozyjnej zastosowano nowoczesną metodę plazmowego utleniania elektrolitycznego (PEO). Otrzymane powłoki poddano wnikliwej charakterystyce, wykorzystując techniki SEM (skaningowa mikroskopia elektronowa), EDS (spektroskopia dyspersji energii) oraz XRD (dyfrakcja rentgenowska). Pomiarzy te pozwoliły na określenie mikrostruktury, składu fazowego i odporności korozyjnej. Dodatkowo przeprowadzono testy w środowisku silnie

korozyjnych soli hydratowych oraz badania cykliczne ładowania i rozładowywania akumulatora cieplnego, co umożliwiło ocenę stabilności funkcjonalnej powłok w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Całość metodyki badań cechuje się wysokim poziomem zaawansowania i staranności. Należy podkreślić, że Autorka nie ograniczyła się do jednego podejścia, lecz zastosowała synergiczne połączenie różnych technik – od symulacji CFD, poprzez odlewnictwo, aż po analizy materiałowe i funkcjonalne. Tak zaplanowana i przeprowadzona metodyka pozwoliła na kompleksowe rozwiązanie postawionego problemu badawczego.

2.6. Dyskusja wyników

Dyskusja wyników przedstawiona w rozprawie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny została moim zdaniem opracowana w sposób szczegółowy, logiczny i spójny. Autorka nie ogranicza się jedynie do prezentacji uzyskanych rezultatów, ale podejmuje się ich krytycznej interpretacji, zestawiając własne obserwacje z doniesieniami literaturowymi i istniejącymi modelami teoretycznymi.

W części dotyczącej analiz numerycznych szczegółowo omówiono wpływ kształtu wkładek cieplnych na dynamikę topnienia i zestalenia PCM. Wyniki jednoznacznie wskazały, że struktury o rozbudowanej geometrii biomimetycznej prowadzą do istotnej poprawy transferu ciepła w porównaniu ze strukturami prostszymi. Autorka wskazała, że długość i liczba rozgałęzień mają kluczowe znaczenie dla szybkości ładowania i rozładowywania układu. Dyskusja została wzbogacona porównaniami z wynikami badań innych autorów, co pozwoliło wykazać oryginalny wkład w obszarze projektowania geometrycznego wkładek.

W części eksperymentalnej poświęconej odlewnictwu cienkościennych struktur aluminiowych dokonano oceny wpływu parametrów procesu na jakość odlewów. Autorka zwróciła uwagę na zjawiska mikro- i makroskurezu oraz ich zależność od warunków technologicznych. Szczególnie cenne jest wskazanie stopu AlMg3 jako najbardziej perspektywicznego materiału, co nie tylko poszerza wiedzę naukową, ale również ma bezpośrednie implikacje praktyczne dla przyszłych zastosowań.

Najbardziej interesująca część dyskusji dotyczy badań nad powłokami PEO. Autorka wykazała, że zastosowanie powłok znacząco poprawia odporność korozyjną wkładek aluminiowych w środowisku soli hydratowych, a jednocześnie nie pogarsza przewodnictwa cieplnego całego układu. Uzyskane krzywe temperaturowe dla wkładek powlekanych i niepowlekanych okazały się porównywalne, co dowodzi wysokiej wartości praktycznej tej metody ochrony. Dyskusja jest wnikliwa – Autorka analizuje możliwe mechanizmy działania powłok, potwierdza skuteczność obserwacjami SEM, EDS i XRD, a także omawia perspektywy ich dalszego rozwoju.

Całość dyskusji charakteryzuje się dojrzałością naukową. Autorka nie unika wskazywania ograniczeń przeprowadzonych badań, m.in. związanych z powtarzalnością procesów odlewniczych czy specyfiką środowisk testowych. Dzięki temu dyskusja zyskuje na wiarygodności i stanowi mocny fundament do planowanych prac kontynuacyjnych.

2.7. Prezentacja wyników – jakość tabel, wykresów i grafiki

Prezentacja wyników w rozprawie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny zasługuje na bardzo wysoką ocenę. Tabele, wykresy oraz ilustracje zostały przygotowane z dużą starannością edytorską, a ich forma odpowiada wymaganiom stawianym współczesnym publikacjom naukowym.

Tabele zawierają kompletne i precyzyjnie zestawione dane, które są jasno opisane i opatrzone odpowiednimi jednostkami. Ich układ ułatwia porównywanie poszczególnych parametrów i pozwala na szybkie wychwycenie istotnych różnic pomiędzy wariantami badań.

Wykresy są czytelne, dobrze skalowane i posiadają poprawnie oznaczone osie. Autorka stosowała różnorodne formy graficzne – wykresy liniowe, słupkowe czy mapy rozkładów temperatur – zawsze adekwatne do rodzaju prezentowanych wyników. Dzięki temu dane liczbowe uzyskały klarowną i intuicyjną interpretację.

Grafiki i ilustracje (m.in. wyniki symulacji numerycznych, obrazy SEM czy schematy geometryczne struktur) zostały przygotowane na wysokim poziomie technicznym. Modele przestrzenne struktur biomimetycznych przedstawiono w sposób jednoznaczny i estetyczny, co pozwala na pełne zrozumienie analizowanych zagadnień. W szczególności należy docenić graficzną prezentację wyników CFD – przedstawione wizualizacje rozkładów temperatur i dynamiki topnienia PCM są bardzo sugestywne i dobrze ilustrują omawiane zjawiska.

Całość prezentacji wyników cechuje spójny styl graficzny, co ułatwia odbiór treści. Autorka zadbała o czytelność, estetykę oraz pełną zgodność opisów i podpisów z treścią pracy. Dzięki temu część ilustracyjna stanowi nie tylko uzupełnienie, ale integralny i równorzędny element argumentacji naukowej rozprawy.

2.8. Uwagi krytyczne do dyskusji

Mimo, że dyskusja wyników w rozprawie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny została opracowana na bardzo wysokim poziomie, warto wskazać kilka uwag krytycznych, które mają charakter konstruktywny i mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych badań lub doprecyzowania pewnych aspektów. Spodziewałbym się zatem odpowiedzi na poniższe uwagi.

1. Zakres ilościowej walidacji wyników numerycznych – choć symulacje CFD zostały przeprowadzone starannie i zilustrowane licznymi przykładami, w niektórych miejscach brakuje głębszej walidacji ilościowej w odniesieniu do wyników eksperymentalnych lub danych literaturowych. Szersze zestawienie numeryki z rzeczywistymi wynikami laboratoryjnymi mogłoby jeszcze mocniej uwiarygodnić przedstawione modele.
2. Analiza wpływu parametrów procesu odlewniczego – Autorka trafnie wskazała na rolę temperatury odlewania i ilości metalu podawanego do formy w ograniczaniu zjawisk skurczowych. Jednakże brakuje bardziej szczegółowej dyskusji wpływu mikrostruktury uzyskanych stopów (np. udziału faz międzymetalicznych) na przewodnictwo cieplne i trwałość struktur. Tego typu uzupełnienie pogłębiłoby wnioski dotyczące doboru materiałów.
3. Ocena długotrwałej stabilności powłok PEO – badania korozyjne w agresywnym środowisku soli hydratowych oraz testy cykliczne potwierdzają skuteczność powłok, jednak czas ich trwania był ograniczony. Warto byłoby rozważyć dłuższe testy starzeniowe lub dodatkowe badania mechaniczne powłok (np. odporność na szoki termiczne, adhezję), aby w pełni wykazać ich potencjał wdrożeniowy.
4. Aspekt ekonomiczny i wdrożeniowy – rozprawa skupia się głównie na aspektach technologicznych i naukowych, co jest jej niewątpliwą zaletą. Jednak szersze odniesienie się do kosztów wytwarzania cienkościennych struktur oraz do skalowalności metody PEO mogłoby zwiększyć praktyczną wartość pracy w kontekście przemysłowego wdrożenia.
5. Precyzja wniosków dotyczących przewodnictwa cieplnego – w niektórych fragmentach dyskusji Autorka koncentruje się na jakościowym opisie efektów (np. „brak negatywnego wpływu powłok na proces wymiany ciepła”), podczas gdy przydatne byłyby bardziej ilościowe wskaźniki (np. procentowe porównanie sprawności układów z powłoką i bez niej).

Podsumowując, uwagi te nie podważają wartości naukowej ani oryginalności rozprawy. Mają charakter uzupełniający i wskazują na kierunki dalszych analiz, które mogłyby jeszcze pełniej potwierdzić i wzmocnić zaprezentowane wnioski.

3. Wniosek końcowy

Przedłożona rozprawa doktorska mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny pt. *Development of Cast Heat Enhancers for Corrosive PCM-Based Energy Storage System* stanowi opracowanie o wysokim poziomie merytorycznym, metodologicznym i edytorskim. Praca wpisuje się w aktualne i niezwykle ważne zagadnienia związane z rozwojem technologii magazynowania energii cieplnej, a jej interdyscyplinarny charakter łączy inżynierię mechaniczną, materiałową, technologię odlewnictwa oraz inżynierię powierzchni. Na podstawie analizy treści rozprawy oraz jej rezultatów przedstawiam poniższe oceny szczegółowe.

1. Rozprawa w pełni potwierdza szeroką i ugruntowaną wiedzę teoretyczną Autorki. Przegląd literatury został przeprowadzony wnikliwie i krytycznie, obejmuje zarówno klasyczne opracowania, jak i najnowsze publikacje. Autorka trafnie zidentyfikowała luki badawcze oraz osadziła swoje badania w aktualnym kontekście naukowym. Zakres omawianych zagadnień – od procesów transportu ciepła w układach PCM, przez technologie wytwarzania cienkościennych struktur odlewanych, aż po nowoczesne metody zabezpieczeń powierzchniowych – świadczy o dojrzałości naukowej Doktorantki i jej znakomitej orientacji w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.
2. Doktorantka wykazała umiejętność samodzielnego planowania, prowadzenia i interpretacji badań naukowych. Opracowany program badawczy obejmował symulacje numeryczne (CFD), eksperymenty odlewnicze oraz analizy powierzchniowe i korozyjne, a jego realizacja została przeprowadzona w sposób konsekwentny i metodycznie poprawny. Autorka posłużyła się szeregiem nowoczesnych technik (SEM, EDS, XRD, PEO), a uzyskane wyniki poddała krytycznej interpretacji. Świadczy to nie tylko o wysokim poziomie warsztatu badawczego, lecz również o zdolności do samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów mechanicznych i materiałowych.
3. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu badawczego, jakim jest poprawa efektywności cieplnej i odporności korozyjnej systemów TES bazujących na PCM. Nowatorstwo pracy przejawia się w interdyscyplinarnym podejściu – zaprojektowaniu struktur biomimetycznych, opracowaniu technologii ich odlewania oraz wprowadzeniu powłok PEO jako skutecznej i neutralnej cieplnie ochrony antykorozyjnej. Rozwiązania te nie były dotąd kompleksowo analizowane w literaturze, a ich praktyczny potencjał wdrożeniowy dodatkowo podnosi wartość rozprawy.

Podsumowując, rozprawa mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny spełnia wszystkie wymagania określone w art. 187 ust. 1 Ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Autorka udowodniła, że dysponuje wiedzą teoretyczną odpowiadającą poziomowi doktorskiemu w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, potrafi prowadzić samodzielne badania naukowe oraz jest autorką oryginalnego rozwiązania problemu naukowego o dużym znaczeniu praktycznym. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Natalii Łobacz-Raźny do dalszych etapów postępowania doktorskiego i nadanie Jej stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.



.....
(podpis recenzenta)