

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: „Development of cast heat enhancers for corrosive PCM-based Energy storage system”
„Opracowanie odlewanych wymienników ciepła dla systemów magazynowania energii opartych na korozyjnych materiałach zmiennofazowych”
Autor rozprawy: mgr inż. Natalia Łobacz-Raźny
Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Naplocha
Promotor pomocniczy: dr inż. Carsten Blawert

Podstawa wykonania recenzji

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego W10/RDND07/141/2025 z dnia 18 czerwca 2025 roku.

Ocena formalna rozprawy (ogólne omówienie rozprawy)

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 155 stron. Zasadnicza część rozprawy została podzielona na 9 rozdziałów.

Rozdziały od 1 do 4 zawierają analizę stanu wiedzy dotyczącą systemów magazynowania energii cieplnej, materiałów stosowanych w tych systemach, sposobów wykonywania wymienników ciepła i ich zabezpieczenia antykorozyjnego. Analizowano także zagadnienia związane z symulacją numeryczną procesów wymiany ciepła i przemian fazowych. Każdy z rozdziałów zakończony jest podsumowaniem.

W rozdziale 5 zdefiniowano cel, zakres pracy i program badań. Autorka sformułowała cel pracy: „Opracowanie odlewanych wymienników ciepła dla systemów magazynowania energii opartych na korozyjnych materiałach zmiennofazowych”.

W rozdziale 6 przedstawiono metodykę oraz wyniki badań numerycznych wykonywanych w celu optymalizacji kształtów wymienników ciepła. Autorka szczegółowo przedstawiła i omówiła wyniki symulacji oraz sformułowała wnioski.

W rozdziale 7 Autorka przedstawiła efekty i omówiła wyniki prac badawczych, w których badano proces odlewania cienkościennych wymienników ciepła z wykorzystaniem techniki odlewania precyzyjnego. Badania wykonano dla trzech różnych stopów aluminium, analizowano wpływ parametrów odlewania na jakość uzyskiwanych odlewów.

W rozdziale 8 zaproponowano technikę plazmowego utleniania elektrolitycznego jako metodę zapobiegania korozji wymienników ciepła, wykonanych ze stopów aluminium. Przeprowadzono badania skuteczności ochrony przed korozją oraz wpływu powłoki tlenkowej na proces wymiany ciepła w układzie wymiennika.

Rozdział 9 zawiera podsumowanie dokonań rozprawy i wnioski.

Poza zasadniczą częścią rozprawa zawiera także streszczenia w językach polskim i angielskim, literaturę oraz spisy ilustracji i tabel.

Autorka w pracy powołała się na 194 źródła literaturowe oraz strony internetowe. Zacytowane pozycje literatury zostały dobrane we właściwy sposób. W przeważającej części źródła można uznać za aktualne, wykorzystano 123 pozycje z ostatnich 10 lat w tym 82 pozycje z lat 2020-2025. Mocną stroną doboru źródeł jest ich różnorodność, ponieważ Autorka cytuje zarówno artykuły naukowe, książki, publikacje konferencyjne, normy oraz źródła internetowe. Podsumowując stwierdzam, że dobór źródeł literaturowych oraz ich wykorzystanie dla opracowania przeglądu literatury, stoją na dobrym poziomie.

Układ przedstawionej do recenzji rozprawy jest prawidłowy. Struktura pracy jest logiczna, a podział na rozdziały jest prawidłowy. Szata graficzna jest przejrzysta i dopracowana, a zamieszczone w pracy rysunki, poza kilkoma wyjątkami, są czytelne. Praca zredagowana jest poprawnie, jednak Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów redakcyjnych, których liczba nie odbiega od średniej dla tego rodzaju prac i nie wpływa na ogólną ocenę pracy.

Jako przykłady niedociągnięć mogą posłużyć następujące elementy rozprawy:

1. Na stronie 83 Autorka odwołała się do rysunku 2.6e. W pracy nie ma rysunku o takim numerze, w rozdziale 2 numeracja kończy się na rysunku 2.3. W odwołaniu jest mowa o dwóch punktach pomiarowych oznaczonych na rysunku. Prawdopodobnie chodzi o rysunek 6.2e, na którym są zaznaczone trzy, a nie dwa punkty (niestety nie są opisane).
2. Na stronie 112 Autorka błędnie odwołała się do rysunku 7.14b, powinno być 7.12b
3. Słabo czytelne rysunki: 1.9 na stronie 25, 3.1c na stronie 54 i 6.2b,e na stronie 84.

4. Wzory na stronach 66 i 70 oznaczono tym samym numerem (4.1).
5. W tabeli 6.4 na stronie 91 wpisano Al₂Si₇Mg powinno być AlSi₇Mg.
6. Niefortunne sformułowania np. strona 28 „...the most optimal results...” strona 77 „...the most optimal parameters...”.
7. Autorka nie stosuje jednolitych zapisów jednostek dla właściwości termofizycznych np. dla thermal conductivity w rozdziale 1 jest „[W/mK]”, w rozdziale 2 – „[W/(m·K)]”, w rozdziale 6 – „[W/m°C]” i „[W/m]” na stronie 82.
8. Błędy edycyjne np. na stronie 82 „6.24·10⁶” powinno być 6.24·10⁶, na stronie 91 „1.95·10⁵” powinno być 1.95·10⁵.

Podsumowując stwierdzam, że mimo wymienionych niedociągnięć zarówno strona edycyjna jak i poprawność językowa pracy stoją na dobrym poziomie.

Ocena merytoryczna rozprawy

Tematyka przedstawiona w pracy jest aktualna i dotyczy projektowania i wytwarzania odlewanych wymienników ciepła, które są stosowane w systemach magazynowania energii cieplnej wykorzystujących materiały zmiennofazowe.

Technologie magazynowania energii cieplnej mają szeroki zakres zastosowań i mogą znacząco przyczynić się do zrównoważonego rozwoju energetycznego. Systemy te pozwalają na gromadzenie nadwyżek ciepła pochodzącego ze źródeł odnawialnych lub procesów przemysłowych w celu późniejszego wykorzystania. Rozwój tych systemów jest powiązany z coraz powszechniejszym stosowaniem systemów wykorzystujących energię słoneczną, w których występują problemy z zagospodarowaniem nadwyżek energii. Stosowanie systemów magazynowania energii cieplnej pozwala na efektywne wykorzystanie zmagazynowanej energii w czasie gdy będzie na nią zapotrzebowanie. Dodatkowym czynnikiem, który ma wpływ na rozwój systemów magazynowania energii są wprowadzane ostatnio w Polsce i UE dynamiczne taryfy opłat ze energię elektryczną, w których ceny energii zależą od podaży i popytu. W przypadku gdy warunki pogodowe sprzyjają dużej produkcji energii ze źródeł odnawialnych, cena energii elektrycznej jest bliska 0 zł. W takiej sytuacji zamienienie tej energii na ciepło i jej magazynowanie może przyczynić się do obniżenia kosztów energii cieplnej i wpłynąć pozytywnie na bilansowanie sieci energetycznych.

W celu zwiększenia efektywności systemów magazynowania energii cieplnej często stosuje się w nich materiały zmiennofazowe, które magazynują energię w postaci ciepła

utajonego. Niestety materiały te charakteryzują się niską przewodnością cieplną, która wpływa na czasy nagrzewania i chłodzenia magazynu energii, w związku z tym konieczne jest stosowanie odpowiednich wymienników ciepła, które mają zapewnić możliwie jak najbardziej równomierne nagrzewanie lub chłodzenie całej objętości materiału zmiennofazowego.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że podjęty przez Autorkę temat jest niezmiernie ciekawy zarówno z naukowego jak i użytecznego punktu widzenia.

Mogę także stwierdzić, że opiniowana praca wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna, w której została przedstawiona.

Autorka wykazała się dobrą umiejętnością opracowania przeglądu literatury i na jego podstawie sformułowała cel oraz zakres pracy, które przedstawiła w *Rozdziale 5* swojej rozprawy. Celem rozprawy jest opracowanie odlewanych wymienników ciepła dla systemów magazynowania energii opartych na korozyjnych materiałach zmiennofazowych.

Zdefiniowany został również zakres pracy obejmujący: wyznaczenie i wybór optymalnych kształtów wymienników ciepła na podstawie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem programu Flow-3D; analizę procesu wykonywania cienkościennych odlewów wymienników ciepła ze stopów aluminium metodą odlewania precyzyjnego i wybór optymalnych parametrów procesu; wytworzenie na powierzchni odlewu ze stopu EN AC-44200 powłoki tlenkowej metodą plazmowego utleniania elektrolitycznego oraz badania odlewów z wytworzonymi powłokami w środowisku korozyjnym.

Autorka na podstawie analizy literatury wybrała kształty wymienników ciepła (w pracy nazywane są *insertami*) typu „*plątek śniegu, drzewko, drzewko na podporze*” i przeprowadziła dla nich badania symulacyjne w programie Flow-3D, w których zmieniała kształt elementów w celu uzyskania optymalnego przepływu ciepła w systemie magazynowania energii. Analizowane były różne przypadki nagrzewania, w których źródło ciepła znajdowało się w środku, na dole lub na zewnętrznej ścianie zbiornika. W wyniku przeprowadzonych licznych badań symulacyjnych i analiz Autorka stwierdziła, że odpowiedni dobór kształtu tj. długości i liczby rozgałęzień ramion oraz grubość ścianki wymiennika ciepła wpływa na szybkość topienia materiału złoża i obniża gradient temperatury w złożu. Przy czym wpływ grubości ścianki ma mniejszy wpływ na szybkość topienia materiału złoża niż długość i liczba rozgałęzień ramion wymiennika ciepła.

W kolejnej części planu badań opracowano technologię wykonania cienkościennego odlewu wymiennika ciepła z wykorzystaniem technologii druku 3D i odlewania precyzyjnego. Przygotowano formy gipsowe i wykonywano w nich odlewy testowe. Testowano trzy stopy aluminium AlSi12, AlSi7 i AlMg3. Dla każdego z badanych materiałów odlewy wykonywano dla temperatur zalewnia 620, 680 i 720°C oraz dla dwóch temperatur formy 160 i 300°C.

Następnie przeprowadzono analizę jakości uzyskanych odlewów, ze szczególnym uwzględnieniem jakości powierzchni. Wykonano liczne badania odlewów m.in. SEM i EDS. Autorka stwierdziła, że odpowiedni dobór parametrów odlewania pozwolił na uzyskanie bardzo dobrego odwzorowania powierzchni modelu wykonanego w technologii FDM. Dla każdego z testowanych stopów aluminium uzyskano odlewy dobrej jakości. Najlepsze odlewy uzyskiwano dla temperatury zalewania 720°C.

Ostatnia część planu badań dotyczy wyboru metody zapobiegania korozji odlewanych aluminiowych wymienników ciepła w środowisku korozyjnych materiałów zmiennofazowych. W ramach tej części badań w celu wykonania ochronnej powłoki tlenkowej na powierzchni odlewu ze stopu AlSi12 zastosowano metodę plazmowego utleniania elektrolitycznego. Proces przeprowadzono w dwóch różnych roztworach elektrolitu dla czasu 10 i 15 minut. Tak przygotowane próbki oraz próbki odlewane bez powłoki ochronnej badano w procesie cyklicznego (25 cykli) obciążenia poprzez topienie i swobodne chłodzenie w środowisku korozyjnym. Podczas testów badano zmianę masy próbek, a także wykonano badania SEM, EDS i XRD. W wyniku analizy wyników badań Autorka stwierdziła, że próbki odlewane niepokryte ochronną powłoką cechowały się obecnością produktów korozji oraz nieznacznym spadkiem masy. Natomiast na powierzchni próbek z ochronną powłoką tlenkową nie zaobserwowano zmian związanych z degradacją w środowisku korozyjnym i nie stwierdzono ubytku masy próbek. W końcowej fazie badań sprawdzono jeszcze jaki jest wpływ powłoki ochronnej na proces nagrzewania i chłodzenia magazynu energii. W warunkach laboratoryjnych wykonano serię cykli nagrzewania i chłodzenia magazynu energii dla wymienników ciepła z pokryciem ochronnym i bez pokrycia. W wyniku analizy wyników badań Autorka stwierdziła, że pokrycia ochronne nie mają wpływu na przebieg procesu nagrzewania i chłodzenia magazynu energii.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że proces projektowania i wytwarzania odlewanych wymienników ciepła, które są stosowane w systemach magazynowania energii cieplnej wykorzystujących materiały zmiennofazowe został przeprowadzony prawidłowo.

Rozprawa doktorska prezentuje dobrą ogólną wiedzę Autorki w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Autorka wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a mianowicie: potrafiła dostrzec i sformułować problem w zakresie inżynierii mechanicznej, potrafiła przeprowadzić analizę literatury, potrafiła sformułować cel rozprawy, zastosowała odpowiednie narzędzia badawcze i poprawnie wyciągnęła wnioski.

Uwagi szczegółowe i pytania do Autorki.

Podczas lektury rozprawy nasuwają się wymienione poniżej uwagi i pytania dotyczące merytorycznej strony dysertacji, które zdaniem recenzenta wymagają dodatkowych komentarzy i doprecyzowania ze strony Autorki. Pragnę zaznaczyć, że większość z nich ma charakter dyskusyjny i nie należy ich traktować jako bezpośredniego wskazania niedociągnięć czy błędów, lecz jako element konstruktywnej wymiany poglądów i uzupełnienia argumentacji.

1. Na stronie 87 zamieszczono rysunek 6.4, na którym przedstawiono zmiany temperatury uzyskane z symulacji w materiale PCM w punktach na różnych wysokościach od podstawy (6.4a,b,c). Analizowany przypadek dotyczy podgrzewania od dołu. Proszę o wyjaśnienie z czego wynikają uzyskane w symulacji spadki temperatury np. insert 3 na dole - czas od 110 s do 120 s spadek temperatury z 150°C do 134°C podobnie spadki temperatury pomiędzy 85 s a 88 s oraz insert 1 pomiędzy 62 s a 65 s.
2. W rozdziale 6.1.1 „Numerical approach” podane informacje dotyczące warunków symulacji nie są wystarczające. Brakuje np. informacji o źródle ciepła podczas ogrzewania od dołu, podana jest tylko temperatura natomiast nie ma informacji w jakiej postaci wprowadzono to źródło ciepła do symulacji i jak zdefiniowano warunek brzegowy. Brakuje także informacji o warunku brzegowym dla pary insert-PCM, jaki współczynnik HTC (heat transfer coefficient) przyjęto dla insert-PCM w stanie stałym, a jaki dla insert-PCM w stanie ciekłym? Na stronie 83 błędnie podano wielkości elementu siatki „ $3.4 \cdot 10^4$ m” i „ $1.5 \cdot 10^4$ m” – w odniesieniu do wielkości symulowanej struktury powinno to być $3.4 \cdot 10^{-4}$ m i $1.5 \cdot 10^{-4}$ m.
3. Na stronie 82 w tabeli 6.2 błędnie podano jednostkę „density-specific heat [kg/ms²°C]”
4. W rozdziale 7 przedstawiono odlewy wykonywane dla różnych parametrów procesu, zmieniano temperaturę zalewania i temperaturę początkową formy. Analizowano wpływ tych parametrów na jakość odlewów. Na rysunku 7.16a pokazano m.in. odlew, w którym powstał niedolew. Ze względu na kształt odlewu i małe grubości ścianek zaprojektowanie układu wlewowego i dobranie parametrów procesu odlewania wymaga dużego doświadczenia, często konieczne jest też wykonanie licznych symulacji. Czy do projektowania technologii odlewania zastosowano symulację procesu odlewania? Czy analizowano zmiany innych parametrów procesu? Dlaczego dla różnych stopów aluminium wybierano w testach takie same temperatury zalewania 620, 680 i 720°C?

5. Na rysunku 8.9 jako jednostkę Masy podano [%], powinno być Zmiana masy [%] jak wynika z podpisu pod rysunkiem. Na rysunku pokazano wyniki obserwacji zmiany masy próbek, niezabezpieczonych i zabezpieczonych powłoką tlenkową, poddanych badaniu cyklicznego obciążenia poprzez topienie i chłodzenie PCM. Dla próbek P15 po 5 cyklach i P10 po 15 cyklach zaobserwowano wzrost masy próbek powyżej masy początkowej. Proszę o wyjaśnienie czy ten wzrost masy wystąpił dla wszystkich próbek P15 po 5 cyklach i P10 po 15 cyklach. Proszę także o podanie informacji jakie są masy próbek (w pracy jest tylko informacja o wymiarach próbki) oraz o błędach pomiarów. Czy błąd pomiaru nie jest większy niż zmiana masy próbki o 0,05%?

Wniosek końcowy

Wymienione uwagi nie zmieniają w niczym faktu, że Autorka zrealizowała postawiony cel rozprawy oraz rzetelnie wykonała postawione zadania.

Podjęta tematyka projektowania i wytwarzania odlewanych wymienników ciepła do stosowania w systemach magazynowania energii cieplnej jest niezwykle istotna i aktualna. Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie wykorzystujące zaprojektowane przez Autorkę odlewane wymienniki ciepła zabezpieczone antykorozyjnie może zostać wykorzystane w praktyce przemysłowej, co wskazuje, że praca ma charakter aplikacyjny.

Moim zdaniem Autorka pracy wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych i wiedzą w zakresie odpowiadającym stosownym przepisom odnośnie do wymogów stawianych rozprawom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa pt. „Development of cast heat enhancers for corrosive PCM-based Energy storage system” („Opracowanie odlewanych wymienników ciepła dla systemów magazynowania energii opartych na korozyjnych materiałach zmiennofazowych”) spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 poz. 1571) i wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr. inż. Natalii Łobacz-Raźny do publicznej obrony.

