

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielawicz, czł. koresp. PAN
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Energii
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12
tel. +58 347 2254
email: Dariusz.Mikielawicz@pg.edu.pl

Gdańsk, 23 kwietnia 2025 r.

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Roberta Mulki pt.

"Impact of ferromagnetic particles on heat transfer process in nanofluids"

wykonana na podstawie zlecenia pismem RDND08/51/2025 z dnia 21 lutego 2025 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Roberta Króla, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka z dnia 19 lutego 2025 r.

Promotorami przedłożonej rozprawy są dr hab. inż. Bartosz Zajęzkowski, prof. PWr oraz PD Dr. –Ing Habil. Mattias H. Buschmann.

1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Impact of ferromagnetic particles on heat transfer process in nanofluids*” dotyczy identyfikacji i analiz eksperymentalnych przepływów laminarnych z obecnością fazy rozproszonej w postaci nanocząstek ferromagnetycznych w kanałach o różnym nachyleniu do poziomu w obecności pola magnetycznego. Tematyka pracy nie jest nowa, niemniej wciąż istnieją obszary wiedzy, które nie są precyzyjnie wyjaśnione i z tego względu praca bardzo dobrze wpisuje się w oryginalną tematykę badawczą. Dysertacja jest monograficznym ujęciem tego skomplikowanego zagadnienia technicznego, które może znaleźć zastosowanie w praktyce. Wartym odnotowania jest również fakt, że praca powstała w wyniku współpracy dwóch ośrodków akademickich tj. Politechniki Wrocławskiej oraz Instytutu Chłodziactwa i Klimatyzacji w Dreźnie. Prof. Buschmann jest osobą o wyróżniających się osiągnięciach w zakresie zagadnień wykorzystujących pole magnetyczne.

Uważam, że podjęta tematyka jest ważna, została właściwie wybrana i posiada do rozwiązania zagadnienia, które mają aspekty naukowe. Temat rozprawy został w pełni zrealizowany co pozwoliło na uzyskanie założonego w pracy celu.

Praca liczy 120 stron i składa się z ośmiu rozdziałów oraz spisu literatury. Brak jest w pracy streszczeń w języku polskim jak i angielskim, co stało się praktycznie standardem w pracach kwalifikacyjnych tego typu. Bibliografia opiera się na 149 pozycjach literaturowych z czego zawiera pięć, w których współautorem jest Doktorant.

We **rozdziale pierwszym** do pracy czytelnik wprowadzony jest w sposób ogólny do tematyki wymiany ciepła poprzez przedstawienie mechanizmów wymiany ciepła oraz ich zastosowanie w wymiennikach ciepła.

W **rozdziale drugim** czytelnik wprowadzony jest do tematyki nanocząstek i ich potencjalnych zastosowań. Kandydat omawia płyny bazowe oraz rodzajne nanocząstek, które dotychczas były wykorzystywane w badaniach. Omawia sposoby wykonywania nanocząstek. Omawia też dla przypadku ferromagnetyków możliwe mechanizmy fizyczne, które mogą być identyfikowane podczas różnych warunków prowadzenia eksperymentów. Swoje rozważania popiera bardzo dokładnym przeglądem literatury związanej z charakterystyką przeprowadzanych pomiarów przepływu. W dalszej części rozdziału Autor przedstawia możliwe zastosowania płynów z nanocząsteczkami, również popierając szeroko omawiane przeze siebie zastosowania pozycjami z literatury. Przedstawia zastosowania w obszarze chłodni kominowych, urządzeń, w których zachodzi umyślna zmiana fazy, czy instalacjach do odzysku ciepła odpadowego z procesów technologicznych.

W **rozdziale trzecim** Doktorant omawia zagadnienia związane z obecnością cząstek ferromagnetycznych w przepływach, szczególnie przepływach laminarnych. Wskazuje na fakt możliwości zaistnienia konwekcji mieszanej dla określonych parametrów przepływu. Podobnie jak w rozdziale drugim swoje rozważania prowadzi w oparciu rzetelny przegląd literatury.

W **rozdziale czwartym** przedstawia tezę pracy oraz cele opracowania. Teza przedstawiona jest w postaci czterech celów, a mianowicie: konieczności zrozumienia zależności pomiędzy siłami magnetycznymi, lepkości, bezwładności i ciężkości w przepływie, analizy wartości krytycznych kryteriów bezwymiarowych, wykorzystywanych w analizie wymiany ciepła, konieczności analizy orientacji przepływu na powstawanie przepływów wtórnych oraz wpływu pola magnetycznego na wzmocnienie/wytlumianie przepływów wtórnych, a w konsekwencji wymianę ciepła. Podsumowuje strukturę całości rozprawy. Należy zauważyć, że część wprowadzająca czytelnika do pracy zajmuje 48 stron, co należy uznać za dobrą proporcję.

W **rozdziale piątym** przedstawiono rozważania związane z wyznaczeniem podstawowych własności rozpatrywanego nanopłynu, tj. lepkości dynamicznej, ciepła właściwego, współczynnika przewodzenia ciepła oraz gęstości. Wszystkie te wielkości wyznaczono eksperymentalnie i porównano z odnośnikami literaturowymi uzyskując dobrą zgodność. Dużą uwagę Kandydat skupił na wyznaczeniu kąta zwilżania w warunkach bez wpływu sił magnetycznych oraz ich uwzględnieniem. Omawia metodykę przeprowadzania badań kąta zwilżania na własnym stanowisku pomiarowym.

W **rozdziale szóstym** przedstawiono badania eksperymentalne, które są podstawą niniejszej dysertacji. Kandydat przedstawia szczegółowo stanowisko badawcze oraz procedurę pomiarową oraz sposób redukcji wyników do postaci uogólnionej. Wprowadza liczbę magnetyczną Mn będącą stosunkiem przyłożonej siły magnetycznej do siły bezwładności. Omawia dokładnie analizowane przypadki przepływu, w których w dużej mierze skupia swoją uwagę na wpływie pola magnetycznego na przepływ w obszarze konwekcji mieszanej. Analizuje różne sposoby przyłożenia pola magnetycznego do sekcji pomiarowej. Wyznaczono błąd dopasowania lokalnego.

W **rozdziale siódmym** analizowana jest orientacja przestrzenna sekcji pomiarowej, tj. kąta jej nachylenia do poziomu. Okazuje się, że również w tym przypadku występują interesujące zjawiska w przepływie. Największy efekt intensyfikacji wymiany ciepła występuje w przepływie poziomym, a wraz ze wzrostem kąta nachylenia intensyfikacja maleje, co jest tłumaczone zanikaniem przepływów wtórnych.

W **rozdziale ósmym** przedstawiono podsumowanie wyników pracy oraz wnioski.

Należy stwierdzić, że struktura pracy jest typowa dla prac kwalifikacyjnych. Konstrukcja pracy tworzy logiczną całość i jest przejrzysta oraz czytelna. Pozytywnie ocenić należy proporcję ilości stron pracy poświęconych przeglądowi literatury i części badawczej. W pracy przeanalizowano 149 pozycji literaturowe co dało wystarczająco szeroki widok na podjętą tematykę pracy.

2. Tezy badawcze pracy

Doktorant w swojej pracy nie stawia bezpośrednio tezy badawczej, ale postuluje cele prowadzonych badań w postaci czterech kwestii, a mianowicie: konieczności zrozumienia zależności pomiędzy siłami magnetycznymi, lepkości, bezwładności i ciężkości w przepływie, analizy wartości krytycznych kryteriów bezwymiarowych, wykorzystywanych w analizie wymiany ciepła, konieczności analizy orientacji przepływu na powstawanie przepływów wtórnych oraz wpływu pola magnetycznego na wzmocnienie/wytlumianie przepływów wtórnych, a w konsekwencji wymianę ciepła. Jak widzimy nie jest to teza tylko zdanie charakteryzujące cel prowadzonych przez Doktoranta badań i potwierdza aspekty poruszone w przedstawionej do oceny pracy. Problem naukowy rozwiązany z pracy jest związany ze zbadaniem szeregu wpływów na wymianę ciepła przy uwzględnieniu sił pola magnetycznego. Zagadnienie to nie jest trywialne, gdyż w zależności od udziałów poszczególnych sił, tj. sił lepkości, bezwładności, ciężkości i magnetycznych powstaje lub zanika efekt intensyfikacji wymiany ciepła. Właściwe określenie modelem matematycznym jest bardzo trudnym wyzwaniem naukowym.

Zakres wykonanych przez Kandydata prac spełnia oczekiwania stawiane pracom kwalifikacyjnym, czyli dysertacja w pełny sposób wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z obecnością nanocząstek ferromagnetycznych w przepływie w polu magnetycznym oraz przedstawia ich dogłębną analizę za pomocą posiadanych badań oraz analiz.

Doktorant wykazuje wypełnienie nakreślonego zakresu prac i dokumentuje je wynikami przeprowadzonych eksperymentów.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. budowa stanowiska do badań kąta zwilżania w obecności sił magnetycznych,
2. przeprowadzenie systematycznych pomiarów kąta zwilżania w obecności sił magnetycznych i w ten sposób identyfikacja i opis interakcji kropla-pole magnetyczne.
3. budowa stanowiska badawczego do badań przepływów laminarnych w obecności pola magnetycznego.
4. Przeprowadzenie systematycznych badań przepływu konwekcyjnego w warunkach laminarnych z uwzględnieniem sił magnetycznych. Szczególnie wartościowe są badania w zakresie konwekcji mieszanej.

4. Wartości użytkowe pracy

Intensyfikacja wymiany ciepła jest podstawowym zagadnieniem badawczym. W przedmiotowej pracy efekty są badane w obecności pola magnetycznego. Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się potencjalnie bardzo dużymi wartościami użytkowymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy wykazują możliwości intensyfikacji przepływu z nanocząstkami ferromagnetycznymi. Nie wszystkie parametry przepływu wykazują możliwości intensyfikacyjne i takie obszary należy wykluczać z zastosowań

technicznych. W takich przypadkach nie ma w pełni opracowanych modeli takich pomiarów. Zaproponowane narzędzia badawcze w postaci kryteriów liczbowych oraz map przepływu umożliwiają dogłębną analizę takich przepływów. Prowadzenie pomiarów w instalacjach przepływowych bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do oceny praca wskazuje, że Doktorant posiada wiedzę i potrafi ją przedstawić w formie rozwiązanej zadania badawczego. Jest to niezwykle istotne dla ośrodków szkolnictwa wyższego i spełnia aktualne wymagania i oczekiwania przeprowadzonej reformy szkolnictwa wyższego. Praca jest ciekawa i wpisuje się w aktualne trendy naukowe związane z możliwościami intensyfikacji wymiany ciepła w warunkach działania pola magnetycznego. W mojej opinii praca jest wartościowa, jej oryginalność jest związana z zagadnieniami przepływów laminarnych z obecnością pola magnetycznego. Przedstawione analizy stanowią istotny wkład do problematyki pomiarów w warunkach działania pola magnetycznego. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest więc pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia wartościowe rezultaty.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy, jeżeli przyglądamy się wynikom obliczeń i analiz. Praca napisana jest poprawnym językiem angielskim, z wykorzystaniem właściwej terminologii. Na uwagę zasługuje nienaganna strona edytorska pracy. Praktycznie autor nie popełnił żadnych uchybień językowych ani literówek.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem wymieniam poniżej:

1. Z lektury rozprawy zauważam, że prace prowadzone były na jednym płynie z nanocząsteczkami (MSG-W10). W pracy podano zakres stężenia od 2.8 do 3.5%). Czy określono precyzyjnie jaka była wartość tego stężenia w eksperymencie?
2. Czy uzyskane wyniki byłyby takie same gdyby była możliwość kontroli wartości stężenia w przepływie?
3. Czy był badany rozmiar nanocząstek?
4. Przy określaniu kąta zwilżania wyznaczono go na dwóch powierzchniach, tj. miedzi i aluminium. Czy chropowatość powierzchni ma wpływ na kąt zwilżania? Czy chropowatość powierzchni była mierzona?
5. W równaniu (5.12) Kandydat pisze, że jest to zmodyfikowana zależność Maxwell'a. Czy proponowane równanie jest własnym wkładem Doktoranta czy jest to zależność z literatury (wówczas brak jest odniesienia). W efekcie końcowym Czytelnik nie wie z jakiego równania był określany współczynnik przewodzenia ciepła.
6. Jaka była długość sekcji pomiarowej przedstawionej i omawianej na rys. 6.1, 6.2 i 6.3?
7. Typowymi interakcjami pomiędzy przepływem z ferronanocząsteczkami a polem magnetycznym jest grupowanie się nanocząstek w okolicy ścianki (wall aggregation) czy grupowanie się sekwencyjne (chain formation) czy też przepływy wtórne (secondary flows). Proszę o wskazanie jakimi technikami pomiarowymi można by wizualizować takiej przepływy. Czy są możliwe takie techniki w laboratoriach badawczych gdzie prowadzono prace związane z doktoratem?
8. W kontynuacji do poprzedniej kwestii proszę o określenie jaki mechanizm interakcji przepływ z ferronanocząsteczkami a pole magnetyczne powinien być promowany celem uzyskania najlepszego efektu intensyfikacji wymiany ciepła.
9. Jakie są rekomendacje Doktoranta w stosunku do dalszych pracy w przedmiotowym obszarze?

Jak wspomniałem w pracy występują naprawdę nieliczne błędy edytorskie, które pokrótce wymieniam:

- 1) Str. 93¹ – powinno być: $4.2 \cdot 10^5$ oraz $7 \cdot 10^6$
- 2) Opis bibliograficzny powinien być według jednego formatu.

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania i pomiarów w przepływach z uwzględnieniem pola magnetycznego. Dotyczy ona systematycznych badań eksperymentalnych w trudnych warunkach intensyfikacji wymiany ciepła. Interpretacja wyników jest przekonująca, o wysokim poziomie kompetencji Doktoranta. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki inżynierskiej. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy, analizę posiadanych danych doświadczalnych i analizy zagadnienia. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Ponadto wykazał się dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie.

Podsumowując stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, recenzowana dysertacja może zatem stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Roberta Mulki do publicznej obrony.**



