

Prof. dr hab. inż. Piotr Cyklis  
Laboratorium Termodynamiki i Pomiarów Maszyn Ciepłych  
Instytut Inżynierii Ciepłej i Procesowej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Krakowska

Kraków, 12.07.2020 r.

## **RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Doroty Sawickiej**

**pt.: „Experimental and numerical modeling of unconfined free convection of nanofluids”**

### **1. Strona formalna pracy**

Praca doktorska mgr inż. Doroty Sawickiej pt.: „**Experimental and numerical modeling of unconfined free convection of nanofluids**” została wykonana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Janusza T. Cieślińskiego oraz prof. Dr-Ing Sławomira Smolenia jako promotora pomocniczego, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

Praca, napisana w języku angielskim, zawarta została na 116 stronach i podzielona na 10 głównych rozdziałów oraz spis literatury. Ważną część pracy stanowią załączniki zawarte na 54 stronach tak, że w efekcie całość pracy liczy 173 strony.

W pracy wraz z załącznikami zamieszczono kilkaset, bogatych w treść merytoryczną, kolorowych rysunków i wykresów. Spis literatury obejmuje 126 pozycji, głównie z ostatnich lat szeroko i prawidłowo omówionych w tekście pracy.

Warta podkreślenia jest formalna międzynarodowa współpraca przy realizacji tej pracy wyrażająca się nie jedynie w języku pracy ale w tym, że część badań była prowadzona w City University of Applied Sciences w Bremie.

### **2. Celowość podjęcia tematu na tle aktualnych trendów w tej dziedzinie**

Zjawisko konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej jest podstawowym zagadnieniem z zakresu wymiany ciepła badanym chyba od początku istnienia tej nauki, zarówno teoretycznie jak i doświadczalnie. Zastosowanie inżynierskie jest właściwie nieograniczone od magazynów ciepła, poprzez chłodzenie i nagrzewanie powierzchni płaskich, rur, czy innych

geometrii i kształtów. Analizowany jest też konwekcyjny ruch płynu w objętościowych wymiennikach ciepła. Przedstawiona przez Autorkę analiza literatury wskazuje, że pomimo wieloletnich badań i znacznej ilości publikacji zarówno dotyczących modelowania numerycznego jak i badań doświadczalnych wiedza dotycząca tego sposobu wymiany ciepła jest ciągle niepełna, nawet dla czystych cieczy bez udziału nanocząstek. Wprowadzenie do ośrodka ciągłego nanocząstek ciała stałego wpływa na wymianę ciepła poprzez zmianę własności płynu, ale też samo zjawisko wnikania zmienia swój charakter tak, że może zachodzić intensyfikacja procesu wnikania ciepła.

Podsumowując: problem podjęty przez Autorkę jest ważnym problemem naukowym i technicznym, któremu warto poświęcić dysertację naukową.

### 3. Zawartość pracy

Po pierwszym wstępnym rozdziale Autorka podejmuje analizę literatury przedmiotu dzieląc ją słusznie na trzy części:

- literaturę związaną z konwekcją swobodną w przestrzeni nieograniczonej, gdzie w podsumowaniu ujęte zostały zależności na liczbę Nusselta według różnych autorów. To podsumowanie jest ważne gdyż umożliwia później dalsze porównania wyników,
- literaturę związaną z własnościami cieczy wzbogaconych różną zawartością nanocząstek, gdzie podane zostały najbardziej wiarygodne zależności określające przewodność cieplną, lepkość, ciepło właściwe i współczynnik rozszerzalności termicznej,
- literaturę związaną z konwekcją cieczy z nanocząstkami badaną doświadczalnie i teoretycznie przez różnych autorów. Badane były różne zawartości cząstek, różnych materiałów. W podsumowaniu można stwierdzić, że wszyscy autorzy wykazali wpływ pozytywny nanocząstek na wymianę ciepła, niemniej jednak bez precyzyjnego określenia mechanizmu procesu konwekcji w nanocieczach, w szczególności w przestrzeni nieograniczonej.

#### **Analiza literatury pozwoliła na sformułowanie celu i tezy pracy w rozdziale 5:**

„Dodatek nanocząstek  $Al_2O_3$  do roztworu wody/glikolu etylenowego w stężeniu 0.01%, 0.1%, 1% wagowo prowadzi do intensyfikacji konwekcyjnej wymiany ciepła w nanopłynie w porównaniu z płynem bazowym dla danej geometrii systemu termalnego czyli układu grzewczego i zbiornika cieczy”

Teza jest postawiona dobrze, umożliwiając wykazanie jej poprawności lub nie, za pomocą badań eksperymentalnych i numerycznych zaplanowanych i pokazanych w dalszej części pracy.

### 4. Realizacja zadań pracy przez Autorkę

Jak wspomniano wcześniej praca zaczyna się wstępem uzasadniającym dobrze podjęcie problemu naukowego. Następnie przeprowadzono użyteczną analizę literatury, która nie tylko

umożliwiła sformułowanie tez pracy ale także pozwoliła na podanie zależności dla liczby Nusselta przy konwekcji swobodnej jak i obliczeniowych własności termodynamicznych nanocieczy, do dalszego wykorzystania w pracy.

Własna część pracy zaczyna się od rozdziału 5 str. 58, gdzie postawiona została teza.

Rozdział 6 szczegółowo podaje założenia badawcze, co jest ważnym elementem często słabo opisywanym w pracach, Autorka podaje szczegółowo założenia zarówno pod względem czynnika, nanocząstek oraz geometrii. Podano także w tym miejscu założenia do symulacji numerycznej.

Rozdział 7 to opis bardzo zaawansowanych stanowisk badawczych dla przygotowania i badania własności nanocieczy a w szczególności samego stanowiska do badania konwekcyjnej wymiany ciepła zaprojektowanego i wykonanego przez Autorkę, opisanego ze szczegółami. Opisany został również laser służący do badania rozkładu prędkości cząstek za pomocą technologii PiV.

Stanowiska te podłączone zostały do systemu akwizycji danych z oprogramowaniem LabView.

Pomimo istniejących literaturowych korelacji dotyczących lepkości czy przewodności cieplnej Autorka zdecydowała na przeprowadzenie własnych badań tych własności, porównując z korelacjami literaturowymi wskazując na pewne różnice w wynikach badań. Ponadto przeprowadzony został również bardzo ważny test stabilności nanocieczy, metodą optyczną.

Metodę PIV zastosowano w pracy dla określenia rozkładu prędkości lokalnej. Zastosowanie tego narzędzia zasługuje na szczególną uwagę bo pomimo jego obecności na rynku naukowym od już ok. 20 lat to obsługa i badania za pomocą PiV należą do wyjątkowo czasochłonnych i trudnych metod pomiarowych. W tym przypadku Autorka zastosowała metodę „noża świetlnego” dla oceny prędkości w ujęciu 2D. Fakt że Autorka podjęła się zastosowania tej trudnej metody jest wart odnotowania i podkreślenia.

W rozdziale 7 pokazano też analizę niepewności pomiarowej dla zastosowanych metod.

Rozdział 8 to przedstawienie przyjętej metodologii symulacji numerycznych rozdział ten jest dosyć krótki i pozostawia pewnie niedosyt opisowy, niemniej jednak Autorka wykazała się znajomością programowania OpenFoam w ujęciu 2D.

Rozdział 9 rozpoczyna się słusznie od walidacji metod eksperymentalnych i numerycznych, przy czym na początku pokazano wyniki dla czystego glikolu i wody, porównując z dobrze udokumentowanymi zależnościami literaturowymi. Natomiast walidację numeryczną oparto na porównaniu rozkładów prędkości w odległościach 35, 60 i 120 [mm] od wymuszenia. Tu wyniki nie są tak czytelne, dobrze że w załączniku pokazano wyniki pojedyncze. Podsumowaniem tej weryfikacji są wyniki rozkładu prędkości w ujęciu 2D pokazane na rys 9.6 i 9.7. W wynikach tych widać rozbieżności wyników symulacji i eksperymentu, które Autorka stara się wyjaśnić w tekście. Możliwe są tu jednak inne wyjaśnienia, które omówię w następnych częściach recenzji.

Najistotniejszą częścią rozdziału 9 są jednak wyniki badań i ich krytyczna analiza (r. 9.3-9.4) oraz finalny rozdział 9.5 w którym podano własną korelację dla konwekcji swobodnej w przestrzeni nieograniczonej nanocieczy z różnym udziałem cząstek.

Praca zawiera ważne podsumowanie i wnioski końcowe przedstawione w rozdziale 10.

## 5. Najistotniejsze osiągnięcia Autorki

Do istotnych osiągnięć Autorki, stanowiących nowość w stosunku do zgromadzonych danych literaturowych należą:

- a) Krytyczna analiza literatury w trzech aspektach: konwekcyjnej wymiany ciepła, własności fizycznych nanocieczy, wpływu udziału nanocząstek na konwekcję.
- b) Wykonanie nanocieczy i zbadanie ich struktury oraz stabilności.
- c) Zaplanowanie i wykonanie pomiarów własności fizycznych wykonanych nanocieczy.
- d) Zaplanowanie i wykonanie stanowiska do pomiaru ilości wymienianego ciepła wraz z oprogramowaniem w LabView. Zaplanowanie eksperymentu i wykonanie dużej ilości pomiarów własnych, dokonanie analizy wyników i analiza niepewności pomiarowej.
- e) Przeprowadzenie analizy pól prędkości w przekroju 2D za pomocą metody PiV używając „noża świetlnego”.
- f) Przygotowanie własnego modelu symulacyjnego w ujęciu 2D za pomocą programu OpenFOAM i porównanie krytyczne wyników symulacji do wyników eksperymentu uzyskanych za pomocą PiV.
- g) Najważniejszym osiągnięciem jest opracowanie własnej korelacji (9.1) na liczbę Nusselta oraz przedstawienie wniosków.
- h) Na oddzielne podkreślenie zasługuje fakt wniosku nr 5 gdzie Autorka bez ukrywania podaje nie potwierdzenie tezy wpływu dodatku nanocząstek na swobodną konwekcję w przestrzeni nieograniczonej. To rzadki ale bardzo cenny wniosek z pracy doktorskiej.

Osiągnięcia te pozwalają na wyjątkowo pozytywną ocenę pracy doktorskiej.

## 6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Pracę oceniam jako bogatą w treść, czasochłonną w wykonaniu i ciekawą ale chciałbym wskazać Autorce pewne uwagi, których uwzględnienie może przyczynić się do zwiększenia potencjału publikacyjnego pracy.

### 1. Opis stanowisk i badań:

- Brak jest opisu użytego materiału stałego  $Al_2O_3$ , co prawda jest to materiał znany ale warto przytoczyć jego gęstość, rozkład wielkości cząstek i inne własności samego ciała stałego w formie tabelarycznej.
- Zwykle w analizie wirowości cieczy używa się cząstek o gęstości równej gęstości nośnika w metodach PiV. To pozwala na określenie linii prądu i prędkości cieczy nośnej. Autorka co prawda zakłada brak poślizgu ale przy różnicy gęstości ten element może mieć wpływ na wyniki pomiarów.

Opisane i zobrazowane wyniki pomiarów wektorów prędkości dotyczą w rzeczywistości cząstek a nie cieczy.

- Podano wyniki dla kilku przeprowadzonych pomiarów (rys 9.3, 9.4 itd.) znacznie różniące się od siebie. Porównano je z tylko jednym wynikiem symulacji to warto by wyjaśnić szerzej.
- Wyniki podane w tabelach 7.4, 7.5 liczby mają 4 miejsca znaczące, podczas gdy podana niepewność pomiaru to powyżej 1% czyli najwyżej 3 miejsca znaczące.
- W przypadku stanowiska z PiV schemat jest dosyć uproszczony a zdjęcie mało informacyjne. Co prawda w literaturze można znaleźć dużo opisów doświadczeń PiV ale tu w razie publikacji może udało by się uzyskać inną fotografię.
- Na rys 9.4 zniknęła chyba linia pomarańczowa (numerical model, 35 mm)

## 2. Symulacja komputerowa

- Symulacja komputerowa przepływów wielofazowych jest trudna i dlatego opis założeń jest ważny. Na rys 8.1 pokazano siatkę 2D ale na jednym obrazie pokazano siatkę konforemną (conformal) a na drugim niekonforemną (nonconformal). Która była użyta?
- Model cieczy zastosowano taki, któremu w innych narzędziach (FLUENT) nadaje się nazwę mixture, tzn. bez poślizgu i ze średnimi własnościami ciecz/ciało stałe. Nie jest to złe podejście ale może zaburzać fizykę procesu: cząstki mogą mieć większy/mniejszy efekt wyporu ze względu na zmianę temperatury co może częściowo tłumaczyć niezgodność wyników z eksperymentem a na pewno tłumaczy fakt, że czysta ciecz ma takie same wyniki symulacji co nanociecz (wniosek nr 7 w rozdziale 10). Dlatego, warto w przyszłości zastosować inne modele jak na przykład model Eulera-Lagrange (Discrete Phase Model DPM), dostępny w innych programach symulacyjnych. Podkreślić jednak należy, że Autorka wykazała się umiejętnością symulacji ale na pewno rozwinięcie tego elementu będzie „publikowalne”, zwłaszcza gdyby udało się uzyskać wynik z różnicą pomiędzy modelami mixture/DPM.
- Zastosowano model 2D, tymczasem w rzeczywistym układzie mierzonym PiV rozkład wektora prędkości jest trójwymiarowy. Warto się do tego odnieść bo pomiar PiV prawdopodobnie też podaje wynik 2D (zależnie od sposobu pomiaru) ale trzeci wektor prędkości w rzeczywistości jest niezerowy, odbierając część energii cząstki, zatem symulacja 2D spełniając zasadę zachowania energii daje na pewno większe wartości pozostałych dwóch wektorów niż pomiar.
- Autorka przeprowadziła zgodnie z podanymi równaniami symulację procesu nieustalonego. W rzeczywistości tak jest w przepływie konwekcji swobodnej, choć warto dla sprawdzenia przeprowadzić symulację procesu ustalonego. W przypadku konwekcji swobodnej często, w symulacji procesu ustalonego, uzyskuje się rozwiązanie oscylujące podobne do rozwiązania nieustalonego, gdzie kolejna iteracja zastępuje krok czasowy.

## 3. Język i wizualna strona pracy

- Według mojej znajomości języka pracę czyta się łatwo, jest napisana jasno i zrozumiale, są jednak pewne niewielkie elementy którym warto poświęcić dodatkową uwagę:

Zastosowano nazwę „nanofluid” która jest często w literaturze stosowana ale moim zdaniem bardziej odpowiedni byłby „nanoliquid” gdyż jest to ciecz a nie płyn.

W jednym rozdziale np. 6 Autorka używa równolegle Past Perfect Continuous, Simple Past i Present Simple, (was heated, are applied, has been chosen.. etc) nie jestem przekonany czy tych form gramatycznych nie dało by się ujednoczyć.

## 7. Podsumowanie

Wymienione powyżej uwagi są dyskusyjne i nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę pracy.

Praca mgr inż. Doroty Sawickiej jest wartościowym wkładem Autorki w ważną dziedzinę intensyfikacji wnikania ciepła w warunkach konwekcji swobodnej poprzez zastosowanie nanocieczy.

Autorka zbadła zmianę własności cieczy przy zastosowaniu nanocząstek, określiła własne korelacje dla badanych własności oraz korelację dla liczby Nusselta.

Autorka wykazała się umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych i wyciągania prawidłowych wniosków a w szczególności wniosku negatywnego z wyników badań, co należy szczególnie pozytywnie podkreślić.

Autorka wykazała się umiejętnością symulacji komputerowej przepływu w ujęciu nieustalonym wielowymiarowym wykorzystując narzędzie OpenFOAM.

**Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymogi Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z roku 2018 pozycja 1668) jak również wcześniejsze regulacje prawne: ustawa z 14.03.2003 o stopniach i tytule naukowym z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2016r poz 882) i dlatego wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Doroty Sawickiej do publicznej obrony.**

Ponadto chciałbym złożyć wniosek o **wyróżnienie pracy** z następujących powodów:

- praca zawiera znaczącą ilość dobrze opracowanych, „publikowalnych” wyników badań eksperymentalnych wraz z analizą niepewności pomiarowej,
- praca oparta jest na dwóch filarach z których każdy mógłby stanowić odrębną pracę doktorską: pomiary na kilku stanowiskach w tym PiV oraz symulację OpenFOAM wraz z weryfikacją eksperymentalną,
- pracę zrealizowano we współpracy międzynarodowej, co świadczy o umiejętnościach organizacyjnych i współpracy w zespole międzynarodowym.

Piotr Cyklis  
Kraków  
Lipiec 2020