



dr hab. inż. Kamil Śmierciew

Katedra Budowy Maszyn i Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,  
tel. 571 443 096  
500 477 704  
e-mail: k.smierciew@pb.edu.pl

Białystok, 07.08.2019

## Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Kujawskiej *Heat transfer processes in thermosyphon employing nanofluid*

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, Pana Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gnutka, zgodnie z pismem W9/PW/1072/2019.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki, promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Bartosz Zajączkowski.

### I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim i całość obejmuje 162 strony. Rozprawa składa się z następujących części: **nienumerowanych** (w początkowej części pracy) – Acknowledgments, Contents, List of Figures, List of Tables, Nomenclature; w końcowej części pracy są to: List of Publications i Bibliography; oraz części **numerowanych**: Introduction (rozdział 1), Nanofluids (rozdział 2), Heat transfer processes in a thermosyphon (rozdział 3), Experimental characterization of investigated nanofluids (rozdział 4), Two-phase closed thermosyphon (rozdział 5) Geysier boiling (rozdział 6) i Conclusions and perspectives (rozdział 7). Praca nie zawiera streszczenia. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

**Wprowadzenie**, w którym Doktorantka przedstawia krótki zarys historyczny rozwoju termosyfonów, prezentuje i wyjaśnia konieczność podejmowanych w rozprawie prac badawczych, omawia pokrótce strukturę rozprawy oraz definiuje tezy rozprawy, cel i zakres pracy doktorskiej.

**Rozdział 2 i 3** rozprawy stanowią szczegółowy bardzo obszerny przegląd literatury w której prezentowane są dotychczasowe wyniki prac badawczych termosyfonów i nanocieczy.

**W Rozdziale 4** Doktorantka przedstawia szczegółowo charakterystykę badanych próbek nanocieczy, sposób ich przygotowania i podstawowe właściwości termodynamiczne i termokinetyczne.

**Rozdział 5** dotyczy szczegółowego opisu badań eksperymentalnych wraz z prezentacją i dyskusją uzyskanych wyników badań.

**Rozdział 6** poświęcony jest opisowi zjawiska tzw. wrzenia gejszerowego i analizie wyników badań tego typu wrzenia nanocieczy w badanym termosyfonie.

Wynik prac badawczych podsumowano w ostatnim **7 rozdziale** rozprawy.

W9/PW/1243/2019

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 19.08.2019.

**Zestawienie literaturowe** obejmuje wykaz 16 publikacji Doktorantki oraz spis literatury cytowanej w rozprawie, który zawiera 234 pozycje. Są to zarówno pozycje książkowe, monograficzne, jak również najnowsze publikacje, głównie z renomowanych czasopism międzynarodowych z listy JCR oraz raporty instytutowe i referaty konferencyjne.

## II. Teza, cel i zakres rozprawy

**Teza i cel i zakres rozprawy** zostały sformułowane w rozdziale 1 rozprawy.

### Tezy rozprawy:

- Parametry robocze termosyfonu można kontrolować za pomocą odpowiednio dobranego i przygotowanego płynu roboczego – nanocieczy.
- Nanocząstki i surfaktanty zmieniają właściwości płynu bazowego, wpływając na proces wrzenia i ogólną efektywność wymiany ciepła.
- Opór termiczny na ścianie wymiennika ciepła wpływa na ogólną efektywność wymiany ciepła przez urządzenie. Osadzanie nanocząstek w porowatych warstwach na ścianie wymiennika jest kluczowym mechanizmem prowadzącym do poprawy wymiany ciepła.
- W określonych warunkach pracy może wystąpić pseudo-stacjonarny tryb wrzenia - wrzenie gejzerowe. Częstotliwość i intensywność wrzenia gejzerowego można kontrolować za pomocą odpowiedniego doboru płynu roboczego, tj. odpowiednio określonego składu płynu podstawowego, nanocząstek i surfaktantu.

Celem rozprawy jest analiza wpływu nanocieczy (rozumianych jako kompozycja płynu podstawowego, nanocząstek i opcjonalnego stabilizatora) na przenoszenie ciepła i zachowanie się wrzenia w dwufazowym zamkniętym termosyfonie.

### Zakres pracy obejmuje:

- Analiza parametrów i właściwości nanocieczy wpływających na proces wrzenia w termosyfonie. Zagadnienie to poruszone zostało w rozdziałach 3 i 4.
- Zwiększenie strumienia ciepła przenoszonego przez termosyfon w zakresie niskich obciążeń cieplnych za pomocą odpowiednio dobranych nanocieczy (rozdział 5).
- Analiza wpływu procesu wrzenia na nanocząsteczki zawieszonych w nanocieczy (rozdział 5).
- Określenie wpływu nanocząstek i surfaktantów na zjawisko wrzenia gejzerowego (rozdział 6).

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac głównie o charakterze eksperymentalnym zaproponowany przez Doktorantkę ze sformułowanym celem w pełni koresponduje.

## III. Treść rozprawy

Rozdział 1 zatytułowany „Introduction”, stanowi swego rodzaju przewodnik po rozprawie doktorskiej. Doktorantka przedstawia krótką historię badań nad termosyfonami i syntetyczny opis ich budowy i zasady działania. Wprowadzone są podstawowe definicje nanocieczy i nanocząstek. Stwierdza, że głównym powodem tworzenia nanocieczy czyli zawiesin z nanocząstkami jest poprawa przewodności cieplnej płynu podstawowego. Wynika to z faktu,

że przewodność cieplna metalicznych ciał stałych jest o rząd wielkości wyższa niż w przypadku tradycyjnych płynów przenoszących ciepło takich jak np. woda lub glikol etylenowy. Zdefiniowane zostały tezy, cel i zakres prac badawczych podjętych w ramach pracy doktorskiej. Pokrótkie opisano zawartość poszczególnych rozdziałów.

Doktorantka zauważa, że pomimo rosnącej liczby badań, wpływ nanocząstek na właściwości termofizyczne i działanie zawiesin na przemianę fazową jest nadal problemem otwartym. Nanododatki, w zależności od okoliczności i warunków roboczych mogą mieć wyraźnie korzystny wpływ na wymianę ciepła ich wpływ jest dyskusyjny. Pomimo tego, że powszechnie stosowane do poprawy stabilności zawiesin związki chemiczne zmieniają właściwości płynów roboczych, w podejmowanych pracach badawczych ich wpływ jest często zaniewany. Istniejące modele próbują opisać ulepszone mechanizmy wymiany ciepła bądź proponują wyjaśnienia mechanizmów leżących u podstaw, jednakże nie zostały one w pełni wiarygodnie zweryfikowane. Opracowanie odpowiedniego modelu matematycznego procesów zachodzących przy wrzeniu nanocieczki wymaga dogłębnego zrozumienia zachowania i relacji pomiędzy różnymi czynnikami roboczymi i parametrami termofizycznymi. W celu częściowego uzupełnienia tych braków Doktorantka podjęła się badań następujących nanocieczki:

- dwóch rodzajów nanocieczki z nanocząsteczkami złota ale innymi stabilizatorami: polimerem PVP i wodorotlenkiem potasu KOH
- nanocieczki z nanocząstkami węgla ze stabilizatorem SDS oraz na bazie tlenku grafenu z dodatkiem lub bez dodatku SDS
- nanocieczki oparta na bazie nanocząsteczek krzemionki stabilizowanej wodorotlenkiem potasu,
- wodny roztwór dodecylosiarczanu sodu,
- woda destylowana.

Rozdział 2 poświęcony jest nanocieczkom. W rozdziale przedstawiono przegląd literatury prezentujący obecny stan wiedzy nt. nanocieczki i ich właściwości. Zaprezentowano w jaki sposób produkuje się nanocieczki oraz jakie stosuje się dodatki aby utrzymać stabilność nanocieczki. Szczególną uwagę poświęcono właściwościom termofizycznym nanocieczki, zwłaszcza tym, które są istotne z punktu widzenia wymiany ciepła. Doktorantka zauważa, że zmiany parametrów termofizycznych zależą od rodzaju materiału, zarówno płynu bazowego jak i nanocząstek, kształtu i rozmiaru nanocząstek, stężenia, wskaźnika PH, ciśnienia i temperatury. Opisany został wpływ tych parametrów na przewodność cieplną, lepkość, ciepło właściwe, napięcie powierzchniowe i kąt zwilżania nanocieczki.

W rozdziale 3 kontynuowany jest przegląd literatury, w którym uwagę poświęcono procesowi wymiany ciepła w termosyfonach, w których stosuje się nanocieczki. Rozdział przedstawia kompleksową analizę dotychczas przeprowadzonych badań, w tym efektów, jakie mogą być uzyskane poprzez zastosowanie nanocieczki zamiast typowych płynów roboczych, np. woda, opisuje proces wrzenia jako kluczowy w zakresie możliwości intensyfikacji wymiany ciepła. Poświęcono również uwagę rodzajom wrzenia i możliwych skutkach spowodowanych przez zastosowanie nanocieczki. Na podstawie obszernego przeglądu literatury Doktorantka formułuje prawidłowe wnioski, wskazuje braki wiedzy jakie istnieją w zakresie zastosowania nanocieczki w termosyfonach i proponuje metodykę pracy badawczej pozwalającej na częściowe uzupełnienie tej luki.

W Rozdziale 4 dokonano prezentacji badanych nanocieczki. Przedstawione zostały szczegóły dotyczące budowy nanocieczki, tj. sposobu przygotowania, składu i koncentracji nanocząstek, zaprezentowano aparaturę pomiarową oraz wynik badań eksperymentalnych podstawowych

parametrów termofizycznych, które opisano w rozdziale 2. Należy podkreślić, że w pracach eksperymentalnych Doktorantka dokonała pomiarów parametrów termofizycznych również dla wody, pomimo tego, że dane te są dobrze rozpoznane i łatwo dostępne. W ten sposób uwzględniony został błąd systematyczny przyrządu pomiarowego. Świadczy to o dobrym przygotowaniu i prowadzeniu prac badawczych, a prezentowane analizy porównawcze są w pełni wiarygodne. Prezentowane wyniki charakterystyk eksperymentalnych koncentrują się głównie na nanocieczach z tlenku grafenu, oznaczonej w rozprawie jako GO, ponieważ ich właściwości nie są jeszcze dobrze zbadane. Uzyskany w badaniach eksperymentalnych współczynnik przewodności cieplnej nanocieczy GO jest większy od współczynnik przewodności cieplnej wody o około 1.5 %. Uzyskana wartość wzrostu wartości współczynnik przewodności cieplnej zdaniem Doktorantki jest mniejsza niż błąd pomiarowy, który szacowany jest na około 3%, jednakże, tak niska wartość jest efektem bardzo małej zawartości tlenku grafenu w wodzie. W zakresie wpływu nanocząstek na ciepło właściwe i gęstość wody nie stwierdzono istotnych zmian i obecność nanocząstek może być w tym przypadku pominięta. Doktorantka zauważyła również, że zastosowanie zarówno nanocząstek tlenku grafenu jak i surfaktantu SDS obniża napięcie powierzchniowe wody, przy czym większy wpływ na obniżenie napięcia powierzchniowego ma SDS. Na podstawie przeprowadzonych badań, zaproponowana została korelacja pozwalająca oszacować wartość kąta zwilżania dla nanocieczy. Doktorantka jest współautorką proponowanej korelacji.

Przedmiotem rozdziału 5 rozprawy jest szczegółowy opis prac badawczych termosyfonu w którym zastosowano wcześniej wymienione płyny robocze. W rozdziale przedstawiony został opis stanowiska eksperymentalnego i procedur pomiarowych. Zaprezentowano i opisano metodę oceny niedokładności pomiarowych a następnie w sposób graficzny pokazane zostały uzyskane wyniki pomiarowe, które zostały uśrednione w czasie. W tym zakresie analizie poddane zostały takie parametry jak opór cieplny lub ilość przenoszonego ciepła, krzywe wrzenia, rozkłady temperatur i ciśnienie wewnątrz termosyfonu. W dalszej części rozdziału analizie poddana została wewnętrzna powierzchnia parownika, którą Doktorantka sprawdziła za pomocą kamery endoskopowej. Ocena ta miała na celu identyfikację mikrostrukturalnej zmiany powierzchni spowodowanej osadzaniem się nanocząstek na powierzchni wymiennika. Natomiast nanocząstki grafenowe, które pozostały w płynie roboczym odzyskanym z urządzenia po eksperymentach, analizowane były za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorantka stwierdza, m.in. że:

- zmiany w zachowaniu termicznym termosyfonu będące wynikiem zastosowania nanocieczy ograniczone są jedynie do sekcji parownika. Zastosowanie nanocieczy nie wpływa na skraplacz, z uwagi na brak możliwości transportu nanocząstek do górnych części termosyfonu.
- na działanie termosyfonu ma wpływ zarówno obecność nanocząstek, jak i stabilizatorów chemicznych. Wobec tego wpływ obu tych składników należy uwzględniać w analizach i pracach badawczych.
- nanociecze spowodowały podobny efekt jaki powoduje wzrost temperatury wody chłodzącej tj. wzrost średniego poziomu temperatury skraplania.
- wzrost ilości przenoszonego ciepła będący wynikiem zastosowania nanocieczy może być spowodowany przez:
  - a) zmienione warunki panujące na powierzchni parownika w wyniku osadzania się nanocząstek,
  - b) interakcję nanocząstek znajdujących się na ścianie parownika, jak i swobodnie poruszających się w płynie,
  - c) interakcje między nanocząstkami a stabilizatorami chemicznymi,

- d) zmienione właściwości termofizyczne płynu roboczego, między innymi napięcie powierzchniowe i lepkość.

Rozdział 6 omawia zjawiska tzw. wrzenia gejzerowego. Na podstawie rezultatów przeprowadzonych prac badawczych Doktorantka zauważa, że uśrednione w czasie wyniki wskazują, że zmiany w pracy termosyfonu nie są znaczące i mieszczą się w granicach błędów pomiarowych, bez względu na rodzaj zastosowanej nanocieczy. Jednakże, obserwuje się zmiany zależne od czasu. Przy wysokich temperaturach w parowniku większość badanych płynów roboczych pracowała w warunkach wrzenia gejzerowego. Tego typu rodzaj wrzenia jest jak do tej pory nie w pełni rozpoznany a zrozumienie mechanizmów leżących u podstaw wrzenia gejzerowego jest wciąż w początkowej fazie. Zadanie to jest jeszcze bardziej złożone w przypadku zastosowanie nanocieczy, w których konieczne jest uwzględnienie interakcji pomiędzy płynem podstawowym, nanocząstkami, stabilizatorami chemicznymi jak również powierzchnią parownika. Wrzenie gejzerowe z uwagi na złożony mechanizm procesu może skutkować zakłóceniami ciągłości wymiany ciepła i powodować dodatkowe obciążenie mechaniczne, co w efekcie może prowadzić do uszkodzenia komponentów. Termosyfony zazwyczaj stosowane są w układach, które charakteryzują się długim czasem działania. Dlatego prace badawcze powalające na lepsze zrozumienie tego mechanizmu wrzenia są silnie pożądane. W rozdziale Doktorantka dokonuje analizy zjawiska wrzenia gejzerowego na podstawie pomiarów ciśnień wewnątrz termosyfonu. Analiza oparta jest na pomiarze ciśnienia z najniższego przetwornika p3, umieszczonego 100 mm powyżej górnego końca sekcji parownika i 500 mm od spodu urządzenia. Z uwagi na to, że pomiar ten dokonywany jest najbliżej obszaru wrzenia został wybrany on jako pomiar reprezentatywny. W rozdziale pokazano wyniki badań eksperymentalnych, na podstawie których Doktorantka sformułowała wnioski w zakresie wpływu nanocząstek i surfaktantu na proces wrzenia.

W rozdziale 7 przedstawiono syntetyczne podsumowanie wyników w aspekcie założonego zakresu pracy i postawionej tezy oraz przedstawiono plany i potencjalne kierunki dalszych prac badawczych.

#### **IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień związanych z wymianą ciepła w termosyfonach w których zastosowanie znajdują nanociecze. Efektywność i ilość przenoszonego ciepła w termosyfonie ograniczone jest głównie przez właściwości termodynamiczne płynu roboczego. Istotą tworzenia nanocieczy i ich późniejszego zastosowania jako czynnik roboczy jest przede wszystkim zmiana właściwości termofizycznych cieczy podstawowej stosowanej jako płyn roboczy. Zmiany te są pochodną rodzaju materiału nanocząstek, ich kształtu, wielkości, stężenia jak również zastosowania stabilizatorów chemicznych. Z punktu widzenia efektywności energetycznej termosyfonu wzrost strumienia ciepła przenoszonego przez ciecz roboczą w termosyfonie jest silnie pożądana. W ciągu ostatnich dwóch dekad zainteresowanie nanocieczami systematycznie wzrasta z uwagi na ich potencjał i możliwości aplikacyjne w wielu dziedzinach techniki. Na podstawie obszernego przeglądu literatury Doktorantka zauważyła, że istnieją wyraźne braki wiedzy w zakresie zrozumienia mechanizmów przemian fazowych nanocieczy, dostępne wyniki prac badawczych nie są kompletne i wiele zjawisk pozostaje wciąż nierozpoznanych.

Doktorantka podjęła się zatem zagadnienia, które jest kluczowe, zwiększa bowiem bazę danych eksperymentalnych, uporządkowuje i częściowo uzupełnia wiedzę w zakresie wykorzystania nanocieczy jak również precyzyjnie wskazuje kierunki dalszych prac

badawczo-rozwojowych. Podejmowane przez Doktorantkę kompleksowe ujęcie zagadnienia może być uznane za nowe, z uwagi na to, że jak dotąd prace nad nanocieczami w tak szerokim spektrum i ich zastosowaniu w termosyfonach są ograniczone.

Za osiągnięcia Doktorantki uważam:

- przygotowanie próbek nanocieczy
- opracowanie planu eksperymentu;
- wykonanie badań doświadczalnych parametrów termofizycznych nanocieczy oraz parametrów pracy termosyfonu ;
- opracowanie wyników badań doświadczalnych, w tym charakterystyk termicznych urządzenia;
- wykonanie analizy obrazowej powierzchni wymiennika i nanocząstek
- opracowanie wyników pomiarów i analiza zjawiska wrzenia gejzerowego;

Należy podkreślić, że prace badawcze, których wyniki prezentowane są w recenzowanej rozprawie doktorskiej wykonane zostały przez Doktorantkę we współpracy w wieloma ośrodkami zagranicznymi oraz krajowymi. Oznacza to, że zagadnienie zastosowania nanocieczy w termosyfonach cieszy się ogromnym zainteresowaniem. Jednocześnie, jest to dowód na to, że Doktoranta doskonale radzi sobie pracując w zespole zarówno krajowym jak i międzynarodowym. Wyniki prac zostały opublikowane w renomowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej, jak również prezentowane na międzynarodowych konferencjach. Dowodzi to wysokiego poziomu naukowego i praktycznego badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej.

Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane, zaś wskazana teza została w pełni dowiedziona.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy i aplikacyjny w dziedzinie energetyki – zwłaszcza w zakresie zagadnień dotyczących poprawy efektywności oraz optymalizacji wymienników ciepła.

## **V. Wartości użytkowe rozprawy**

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki oraz charakteru. Bez wątplenia efektem naukowym rozprawy jest powiększenie zasobu wiedzy w zakresie intensyfikacji wymiany ciepła poprzez zastosowanie nanocieczy. Przeprowadzone badania eksperymentalne na próbkach nanocieczy o różnej strukturze stanowią ważne uzupełnienie bazy danych zawierającej jak dotąd ograniczone wyniki eksperymentalne. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do walidowania istniejących modeli oraz budowania nowych modeli obliczeniowych termosyfonów opartych na systematycznych pracach eksperymentalnych.

## **VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

### **VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym (w kolejności zgodnej z układem rozprawy)**

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie podejmowanego zagadnienia. Bez wątplenia uzyskanie wyników przedstawionych w rozprawie wymagało

znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktorantki. Poniższe uwagi, mają w dużej mierze charakter porządkowy, stanowią jedynie komentarze bądź sugestie i nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

1. Dlaczego na rys. 4.7b zmniejszono zakres temperatur względem rys. 4.7a ?
2. Doktorantka proponuje korelację na ką zwiłżenia daną równaniem (4.2), przywołując publikację [71]. Jest to publikacja wieloautorska, a Doktorantka jest jedną z autorów. Jaki jest udział Doktorantki w opracowaniu korelacji?
3. Co oznacza przerywana linia na rys. 5.1c?
4. Z tekstu na str. 75 wynika, że dla przyjętej temperatury wody grzewczej 85°C wartość rzeczywista to 80.56°C. Jaka była rzeczywista wartość temperatury na początku zakresu tj. dla 35°C?
5. Jakie wartości  $\rho$  i  $C_p$  przyjęto w równaniu 5.1?
6. W pracy zakłada się, że ilość ciepła jak została pobrana przez wrzącą nanociecz jest równa ilości ciepła wyznaczonego na podstawie pomiaru temperatury cieczy grzejnej i obliczonego z równania 5.1. Czy w jakikolwiek sposób był zbadany wpływ temperatury otoczenia na wyniki?
7. Na rys. 5.2 - 5.5 pokazano straty ciepła w termosyfonie występujących dla temperatury wody chłodzącej skraplacz 25°C i 15°C. Nawiązując do uwagi nr 6 - jaka była temperatura otoczenia?
8. Na rys. 5.3 i 5.4 (na wykresach z prawej strony) oznaczone są punkty o współrzędnych (0,0). Czy te punkty należy uwzględniać w analizie? Jak je interpretować? W tekście nie zostało to wyjaśnione.
9. Na niektórych wykresach (np. rys. 5.7, 5.11 i dalszych) pokazano wyniki próbek opisanych jako *fresh* i *repeated*, przy czym odnosi się to tylko do próbek *GO* i *silica*. Wy tłumaczenie przedstawione w tekście dlaczego powtórzono wyniki jest niewystarczające. Czy pozostałe próbki wykazywały podobne cechy? Dlaczego pokazano obie serie, tj. *fresh* i *repeated*? Którą z tych serii należy traktować jako właściwą, w oparciu o którą można formułować wnioski?
10. Na rys. 5.26-5.30 pokazano rozkład temperatur w funkcji obciążenia cieplnego skraplacza. Dlaczego nie pokazano wyników dla  $t_{ci} = 25^\circ\text{C}$ , dla nanociecz innych niż *GO*.
11. Na rys. 6.1 pokazano dwa wyraźne skoki ciśnienia i podany został czas pomiędzy nimi. Należałoby pokazać rozkład ciśnienia w dłuższym przedziale czasowym, z rysunku trudno wywnioskować, czy te skoki ciśnienia są powtarzalne w podobnych odstępach czasowych. Wrzenie o charakterze gejzerowym to proces na tyle złożony, że trudno oczekiwać systematyczności i powtarzalności struktur.
12. Na rys. 6.4 (wyniki dla wody) pokazany jest rozkład ciśnienia w czasie i obserwuje się podwójny pik w okolicy 3 i 6 sekundy. Podobnie jak poprzednio sugerowałbym pokazanie dłuższego przedziału czasu, aby jednoznacznie ocenić czy podwójny pik jest powtarzalny, co pozwoli na formułowanie wniosków.

## VI. 2. Uwagi porządkowe (w kolejności zgodnej z układem rozprawy)

Należy podkreślić bardzo staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii.

- W spisie symboli błędnie zapisane są jednostki strumienia masy i strumienia objętości.
- Na stronie 10 błędnie zapisany jest wyraz *nanoparticles*
- Brak symbolu M w spisie oznaczeń (równanie 3.1)
- Na rys. 3.1 warto byłoby dodać legendę opisującą znaczenie poszczególnych symboli i uzupełnić oznaczenie pozostałych kolorów
- Na stronie 64 jednostka współczynnik przewodzenia ciepła zapisana jest w sposób W/mK. Taki zapis sugeruje, że mamy do czynienia z milikelwinem
- Sugerowałbym stosowanie podstawowej jednostki ciśnienia i jej wielokrotność zamiast [mbar] na rys. 5.22-5.25.

## VII. Uwagi końcowe

Pomimo drobnych usterek, które mają charakter czysto edytorski praca jest bardzo starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy. Uwagi te nie pomniejszają wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

## VIII. Wniosek do Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą istotny wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych termodynamiki i wymiany ciepła. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa, swoim zakresem wypełnia ramy stawiane pracom doktorskim tak pod względem zakresu rzeczowego, jak i oryginalności osiągnięć poznawczych oraz metodycznych.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Kujawskiej spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: **energetyka**.

Spisław Kowal