

Dr hab. inż. Krzysztof Dutkowski, prof. PK
WM, Katedra Energetyki
Politechnika Koszalińska
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 06.08.2019

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Agnieszki Kujawskiej nt.: „Heat transfer processes in thermosyphon employing nanofluid”

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 15. 07. 2019 r. (Uchwała Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej z dnia 03. 07. 2019 r.).

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Zbigniew Królicki, zaś promotorem pomocniczym dr hab. inż. Bartosz Zajęzkowski, profesor Politechniki Wrocławskiej.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera 164 strony podzielone na siedem rozdziałów. Są to:

1. **Wprowadzenie (Introduction)** w którym Doktorantka definiuje podstawowe pojęcia oraz przybliża zagadnienia związane z tematyką rozprawy. Szerszą uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z wyborem nanocząstek oraz substancji stabilizujących zawiesiny, które stosowano jako dodatki do płynu roboczego w termosyfonie. W rozdziale dodatkowo wskazano podstawowe cele rozprawy doktorskiej oraz przybliżono strukturę recenzowanego opracowania.
2. **Nanopłyny (Nanofluids)** to rozdział w którym, na podstawie przeglądu literatury, przybliżono definicję nanopłynu, przedstawiono kroki milowe w procesie wytwarzania nanopłynów, sposobów syntezy nanopłynów oraz zabiegów zmierzających do uzyskania stabilnej fizycznie i chemicznie zawiesiny. Przedstawiono wady i zalety wynikające z wzajemnego doboru rodzaju cieczy bazowej, materiału nanocząstki oraz materiału substancji stabilizującej zawiesinę. Dużo uwagi oświetlono termofizycznym właściwościom nanopłynu. Przybliżono zagadnienia związane z przewodnością cieplną cieczy zawierającej nanocząstki, jej lepkością, ciepłem właściwym oraz napięciem powierzchniowym.
3. **Procesy wymiany ciepła w termosyfonie (Heat transfer processes in a thermosyphon)** to kolejny rozdział, który powstał w oparciu o przegląd literatury. W rozdziale przybliżono zagadnienia wymiany ciepła podczas pracy zamkniętego termosyfonu dwufazowego. Szeroko opisano dotychczasowy stan wiedzy odnośnie możliwości wykorzystania nanopłynu jako cieczy roboczej w tego typu urządzeniach, a zwłaszcza wynikające z tego konsekwencje. Przedstawiono mechanizm wrzenia w objętości, wrzenia nanopłynu w termosyfonie oraz mechanizm osiadania nanocząstek na powierzchni grzejnej. Opisano struktu-

ry przepływu dwufazowego obserwowane w termosyfonie oraz opisano zjawisko mogące występować podczas pracy termosyfonu, tzw. zjawisko wrzenia gejzerowego. Dokonano przeglądu literatury na temat wrzenia substancji wykorzystywanych do stabilizacji zawiesin oraz wrzenia zawiesin z dodatkiem stabilizatorów. Rozdział zakończono wnioskami wynikającymi z przeglądu literatury. Na podstawie wyciągniętych wniosków Doktorantka wskazała kierunki własnych eksperymentalnych badań poznawczych opisanych w dalszej części rozprawy.

4. **Charakterystyka eksperymentalna badanych nanopłynów (Experimental characterization of investigated nanofluids)** to rozdział, w którym Doktorantka opisała wyniki własnych badań eksperymentalnych. W tej części pracy szczegółowo scharakteryzowano nanocząstki, środki stabilizujące zawiesinę oraz zawiesiny (nanopłyyny) wykorzystane do badań. Zwrócono uwagę na sposób wytworzenia nanopłyynu, kształt i rozmiar nanocząstek, statystyczny rozkład wielkości nanocząstek w zawiesinie, przewodność cieplną, lepkość, ciepło właściwe, gęstość, napięcie powierzchniowe oraz kąt zwilżenia zawiesiny. Opisano sposób realizacji pomiarów oraz użytą do badań aparaturę pomiarową.
5. **Zamknięty termosyfon dwufazowy (Two-phase closed thermosyphon)** jest najbardziej obszernym oraz wartościowym rozdziałem recenzowanej pracy. Przedstawiono w nim wyniki badań własnych Doktorantki zrealizowanych podczas pracy termosyfonu z różnymi rodzajami cieczy roboczej. Szczegółowo opisano budowę stanowiska badawczego, zakres badań eksperymentalnych, wykorzystaną aparaturę pomiarową oraz metodę analizy błędów wyników pomiaru. Zawarto, w formie wykresów, wyniki badań pracy termosyfonu z wykorzystaniem 10 rodzajów cieczy roboczej: woda; zawiesina nanocząstek tlenku grafenu „świeżego” oraz powtórnie wykorzystywanego; roztwór środka powierzchniowo czynnego SDS; zawiesina nanocząstek tlenku grafenu z SDS „świeża” oraz powtórnie wykorzystana; nanopłyn o 2% vol. zawartości nanocząstek ditlenku krzemu, nanopłyn o zawartości 0,1 g/l nanocząstek węgla w kształcie jednościennej rogu, nanopłyn o zawartości 0,1 g/l nanocząstek złota z dodatkiem środka stabilizującego PVP oraz dodatkiem środka stabilizującego KOH. Badania zrealizowano dla dwóch różnych wartości temperatury wody chłodzącej skraplacz (15⁰C i 25⁰C) oraz 12 wartości temperatury wody ogrzewającej parownik termosyfonu (30⁰C do 85⁰C - co 5 K). Wielowariantowe badania umożliwiły określenie wpływu wyżej wymienionych wielkości na wymianę ciepła w termosyfonie (całkowity opór cieplny termosyfonu), eksperymentalne krzywe wrzenia, moc cieplną termosyfonu, średnie w czasie ciśnienie w termosyfonie, zmianę temperatury czynnika ogrzewającego parownik oraz chłodzącego skraplacz, lokalną temperaturę cieczy roboczej wewnątrz parownika termosyfonu, zmianę stanu powierzchni wewnętrznej parownika oraz zmianę zawartości nanocząstek w cieczy bazowej.
6. **Wrzenie gejzerowe (Geyser boiling)** to kolejny, interesujący naukowo rozdział pracy doktorskiej. W rozdziale tym Doktorantka przedstawiła wyniki badań własnych nad zjawiskiem wrzenia gejzerowego („wyrzucania” nieodparowanej cieczy do strefy skraplania), jakie może mieć miejsce podczas pracy zamkniętego termosyfonu dwufazowego. Przedstawiono liczne przebiegi czasowe lokalnego ciśnienia oraz lokalnej temperatury wewnątrz termosyfonu na kilku różnych jego wysokościach uzyskane dla różnych cieczy roboczych oraz kilkudziesięciu parametrów cieplnych. Zaproponowano własne podejście statystyczne do opisu procesu wrzenia gejzerowego. W oparciu o zaproponowane podejście określono parametry, przy których występowało wrzenie gejzerowe oraz określono częstotliwość i amplitudę zjawiska dla każdego z badanych rodzajów cieczy roboczej.
7. **Wnioski oraz wskazówki na przyszłość (Conclusions and perspectives)** to rozdział, w którym zebrano i przedstawiono syntetycznie kilkanaście wniosków wynikających z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz wskazano kierunki działań zmierzających do pogłębienia wiedzy na temat możliwości wykorzystania nanopłynów w termosyfonach.

Dodatkowo w pracy zawarto bibliografię, wykazy użytych oznaczeń, tabel i rysunków oraz publikacji, których Doktorantka jest współautorką.

2. Teza pracy

Tezy badawcze postawione w pracy Doktorantka sformułowała jako:

„Parametry pracy termosyfonu można kontrolować za pomocą odpowiednio dobranego i przygotowanego płynu roboczego - nanopłynu. Nanocząstki i środek powierzchniowo czynny zmieniają właściwości płynu bazowego, wpływając na proces wrzenia i ogólną wydajność wymiany ciepła.

Opór termiczny na ściance termosyfonu wpływa na ogólną efektywność wymiany ciepła urządzenia. Osadzanie nanocząstek w porowatych warstwach na ściance grzejnika jest kluczowym mechanizmem prowadzącym do poprawy wymiany ciepła.

W określonych warunkach pracy może wystąpić pseudo-ustalony tryb wrzenia - wrzenie gejzerowe. Częstotliwość i intensywność zdarzeń w gejzerach można kontrolować za pomocą odpowiedniego doboru płynu roboczego, tj. odpowiednio określonego składu cieczy bazowej, nanocząstek i środka powierzchniowo czynnego.”

W wielu źródłach można znaleźć definicję, iż teza to założenie w formie twierdzącej (niezależnie od postawionych w nim uwarunkowań), które może dotyczyć istnienia nieznanego, lub nie w pełni rozpoznanego zjawiska i jest głównym przesłaniem pracy. Przebieg całej treści pracy badawczej powinien zmierzać do jej udowodnienia, tzn. pozytywnego zweryfikowania albo obalenia. Ponieważ nie trzeba udowadniać rzeczy oczywistych, to stwierdzenie oczywiste nie stanowi tezy. Zgodnie z przytoczoną definicją można stwierdzić, że tezy postawione w treści pracy sformułowano prawidłowo, a opisane problemy naukowe wymagają dalszych analiz. W celu weryfikacji postawionych tez, zdaniem Doktorantki, należy zrealizować szeroko zakrojone badania eksperymentalne polegające na analizie wpływu nanopłynów (cieczy bazowej, nanocząstek i opcjonalnego stabilizatora) na proces wymiany ciepła podczas wrzenia w dwufazowym zamkniętym termosyfonie poprzez:

1. szczegółową charakterystykę użytych nanopłynów,
2. analizę parametrów cieplnych i właściwości nanopłynu wpływających na proces wrzenia w termosyfonie,
3. badanie możliwości intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonie w zakresie niskich obciążeń cieplnych poprzez dobór odpowiedniego nanopłynu,
4. badanie wpływu procesu wrzenia na nanocząstki zawieszony w nanopłynie,
5. eksperymentalne określenie wpływu nanocząstek i środków powierzchniowo czynnych na zjawisko wrzenia gejzerowego.

3. Rozwinięcie tezy

Prezentowana rozprawa doktorska dotyczy badania możliwości intensyfikowania wymiany ciepła w termosyfonie poprzez zastosowanie cieczy roboczej zawierającej dodatek nanocząstek, tzw. nanopłynu. Wyniki badań, w obszarze szeroko rozumianej wymiany ciepła, z wykorzystaniem nanopłynu, jako cieczy roboczej wskazują nawet kilkukrotny wzrost intensywności procesu wymiany ciepła. Koncepcja wykorzystania nanopłynu w termosyfonie stała się oczywistym kierunkiem zainteresowań naukowców. W rozdziale drugim i trzecim swojej

rozprawy Doktorantka dokonuje obszernej analizy źródeł literaturowych w tym zakresie. Przywołuje najnowszą, często nieliczną literaturę dotyczącą nanopłynów i ich wykorzystania w termosyfonach. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż gdy opisywanym w nanopłynach zjawiskom towarzyszą odmienne zachowania Doktorantka przybliżyła nie tylko zaistniały fakt, ale tłumaczy, za autorami publikacji, przyczyny odmiennych zachowań. Stąd przegląd literatury można potraktować jako dwa oddzielne nurty. Jeden z nich to tabelaryczne zestawienie aktualnych publikacji (w tym prezentacja: obiektu badań, zakres badań, uzyskanych efektów, itd.), ale również drugi, w którym tłumaczone są mechanizmy powodujące odmienne zachowanie się nanopłynów w analizowanych układach wymiany ciepła. Doktorantka konkluduje, że dostępne w literaturze dane, dotyczące wymiany ciepła w termosyfonach wypełnionych nanopłynami są niewystarczające, aby wskazać wytyczne do prawidłowego ich projektowania.

Z wyżej wymienionych powodów Doktorantka zaproponowała własne kierunki badawcze oraz przeprowadziła liczne, systematyczne badania wymiany ciepła w zamkniętym termosyfonie dwufazowym. Wykonany z miedzi termosyfon o całkowitej wysokości 1,8 m, średnicy wewnętrznej 20 mm i ściance grubości 1mm w swojej dolnej i górnej części posiadał, odpowiednio, sekcję parowania oraz skraplania. Sekcje te, o długości 400 mm każda, charakteryzowały się tym, że nawinięto na nie przewody rurowe, przez które przepływała woda o określonej temperaturze powodując, odpowiednio, grzanie sekcji parowania oraz chłodzenie sekcji skraplania. W termosyfonie wykonano, na kilku różnych wysokościach, otwory impulsowe do pomiaru ciśnienia panującego wewnątrz termosyfonu. Dodatkowo, w dolnej części termosyfonu, wprowadzono do jego wnętrza, na kilku wysokościach, czujniki termometrów oporowych do pomiaru lokalnej temperatury czynnika. Czynnikiem roboczym było 10 różnych płynów, w tym ciecz wzorcowa (woda) oraz ciecz z dodatkiem nanocząstek. Badania zrealizowano dla dwóch różnych wartości temperatury wody chłodzącej skraplacz (15°C i 25°C) oraz 12 wartości temperatury wody ogrzewającej parownik termosyfonu (30°C do 85°C - co 5 K). Wyniki badań zestawiono w formie charakterystyk (około 40), przeanalizowano je oraz wyciągnięto wnioski.

Zrealizowane badania eksperymentalne oraz analiza wyników badań wskazuje, że postawione przez Doktorantkę tezy zostały zweryfikowane.

4. Oryginalność pracy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy możliwości intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonach poprzez zastosowanie nanopłynu jako cieczy roboczej. Kierunek badań jest zbieżny z obserwowanym postępem technologicznym, który wymusza konieczność odprowadzania dużych ilości ciepła z ogrzewanych powierzchni, a postęp w nanotechnologii dodatkowo poszerza obszar badań poznawczych. Mając powyższe na uwadze Doktorantka opracowała koncepcję wielowątkowych badań termosyfonu, w którym stosowano różne cieczy robocze. O ile termosyfony wypełnione cieczami bez dodatku nanocząstek były obiektem licznych badań, to wykorzystanie nanocząstek, jako dodatku do cieczy bazowej użytej w termosyfonie, jest nowym trendem badawczym wymagającym usystematyzowania pod kątem rodzaju materiału nanocząstki, kształtu i rozmiaru nanocząstki, udziału masowego nanocząstki w cieczy bazowej, jak i analizy wpływ rodzaju oraz ilości substancji powierzchniowo czynnej stabilizującej nanopłyn na procesy wymiany ciepła. Wszelkie metody zmierzające do uogólnienia informacji o możliwości intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonach są źródłem zainteresowań specjalistów z zakresu termodynamiki ze szczególnym uwzględnieniem techniki cieplnej. Recenzowana praca idealnie wpisuje się w aktualny nurt badawczy, a kompleksowe podejście stawia ją, w mojej ocenie, bardzo wysoko.

Ze względu na wielowątkowy charakter recenzowanej pracy można stwierdzić, że opisano w niej wiele aspektów, które zasługują na miano oryginalnych. Wśród najważniejszych należy wymienić: przeprowadzenie badań porównawczych, wykonanych w tych samych warunkach cieplnych z wykorzystaniem 10 rodzajów cieczy roboczej; określenie wpływu rodzaju nanopłynu i parametrów cieplnych występujących podczas pracy termosyfonu na zmianę zawartości nanocząstek w zawieszynie, jak i zmianę ich kształtu; określenie wpływu rodzaju nanocząstek oraz parametrów cieplnych występujących podczas pracy termosyfonu na zmianę topografii powierzchni wewnętrznej parownika; określenie (zależnie od rodzaju cieczy roboczej) zakresu parametrów cieplnych przy których występuje wrzenie gejzerowe. Wszystkie te zabiegi dają informację o możliwych sposobach intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonach oraz wskazują zakres parametrów, przy których praca termosyfonu staje się niestabilna.

Dużym osiągnięciem Doktorantki jest zaproponowanie metody obróbki wyników pomiaru, celem identyfikacji wrzenia gejzerowego. Automatyzacja zmierzająca do analizy przebiegów czasowych zarejestrowanych podczas pracy termosyfonu celem filtracji impulsów ciśnienia wywołanych istnieniem szkodliwego zjawiska wrzenia gejzerowego oraz dalsza obróbka statystyczna uzyskanych danych zmierzająca do identyfikacji częstotliwości oraz amplitudy wahań ciśnienia na skutek „wyrzutu” cieczy roboczej, to kolejny oryginalny wkład Doktorantki w stan wiedzy odnośnie pracy termosyfonu.

5. Wartości poznawcze pracy

Przedstawiona rozprawa doktorska prezentuje wyniki wielowariantowych badań eksperymentalnych zrealizowanych na dedykowanym stanowisku laboratoryjnym. Badania zrealizowano z wykorzystaniem kilku rodzajów czynnika roboczego. Jako czynnik roboczy stosowano ciecz wzorcową (wodę), wodny roztwór środka powierzchniowo czynnego - SDS, wodne zawiesiny nanocząstek wykonanych z różnych materiałów (tlenek grafenu, złoto, ditlenek krzemu), a także o różnym kształcie (płatki, w kształcie rogu, sferyczne). Określono wpływ rodzaju cieczy roboczej na straty ciepła w termosyfonie oraz jego efektywność cieplną poprzez określenie całkowitego oporu cieplnego. Zaprezentowano eksperymentalne krzywe wrzenia uzyskane podczas pracy termosyfonu z różnymi rodzajami cieczy roboczej. Wskazano jak wpływa rodzaj czynnika (nanopłynu) na przebieg krzywej wrzenia czyli de facto współczynnik przejmowania ciepła oraz temperaturę przegrzania ścianki. Wyznaczono procentową zmianę ciepła transportowanego w termosyfonie w odniesieniu do pracy termosyfonu wypełnionego cieczą wzorcową. Eksperymentalnie określono wpływ rodzaju cieczy roboczej na średnie w czasie wartości ciśnienia panującego na różnych wysokościach termosyfonu (tuż nad strefą parownika, tuż przed strefą skraplacza, w połowie wysokości termosyfonu oraz na jego szczycie). Eksperymentalnie określono wpływ rodzaju cieczy roboczej na temperaturę panującą w strefie parowania oraz skraplania. Brak wpływu rodzaju cieczy roboczej na temperaturę w strefie skraplania potwierdził eksperymentalnie, że w termosyfonie brak jest możliwości transportu nanocząstek w fazie parowej cieczy roboczej. W pracy przedstawiono wpływ rodzaju cieczy roboczej na uśrednioną w czasie temperaturę lokalną płynu w strefie parownika (na kilku jego wysokościach). Na podkreślenie zasługuje fakt, że eksperymenty zrealizowano dla kilku wartości temperatury wody chłodzącej skraplacz oraz kilkunastu wartości temperatury wody ogrzewającej parownik. Dodatkowo należy wspomnieć, że jednym z rodzajów cieczy roboczej był wodny roztwór środka powierzchniowo czynnego stosowanego do stabilizacji zawieszin nanocząstek. Wykazano, że zastosowanie w termosyfonie wody zawierającej wyłącznie dodatek środka powierzchniowo czynnego powoduje uzyskanie odmiennych parametrów pracy urządzenia.

Kolejnym elementem istotnym poznawczo jest prezentacja oraz analiza wyników oględzin powierzchni parownika, na której występował w termosyfonie proces wrzenia. Zauważono, że zależnie od rodzaju czynnika roboczego na powierzchni tej mogą tworzyć się osady, których struktura uzależniona jest zarówno od rodzaju cieczy roboczej (rodzaju nanocząstek) jak i intensywności procesu wymiany ciepła na powierzchni kontaktu ciała stałe-ciecz robocza.

Osadzanie nanocząstek na powierzchni grzejnej parownika sprawia, że właściwości cieczy roboczej ulegają zmianie w trakcie pracy termosyfonu. Doktorantka dokonała oględzin płynów roboczych zawierających nanocząstki porównując ich wygląd przed eksperymentem oraz po wykonaniu serii eksperymentów. Wykazano że ubytek nanocząstek jest na tyle duży, że zmiany w wyglądzie nanopłynu są zauważalne „gołym okiem”.

Ważnym poznawczo jest również rozdział opisujący wyniki chwilowego pomiaru ciśnienia oraz temperatury czynnika roboczego wewnątrz termosyfonu. Ogromne ilości danych uzyskanych z pomiarów rejestrowanych 50 razy na sekundę pozwoliły na uchwycenie impulsów ciśnienia oraz wahań wskazań temperatury w momencie występowania zjawiska wrzenia gejzerowego. Dokonano analizy uzyskanych przebiegów czasowych wskazując termodynamiczne skutki wynikające z niestabilnej pracy termosyfonu. Dla każdego z badanych rodzajów cieczy wskazano zakres parametrów, przy których obserwuje się pracę termosyfonu w zakresie konwekcyjnej wymiany ciepła, właściwej pracy - wrzenia oraz pracy niestabilnej – wrzenia gejzerowego.

W efekcie badań własnych Doktorantka uzyskała wskazówki do kolejnych badań, z których słusznie, za najważniejsze uważa między innymi:

- termofizyczną analizę powierzchni parownika po osadzeniu nanocząstek,
- opracowanie modeli matematycznych opisujących działanie termosyfon z nanopłynami,
- przeprowadzenie badań z innymi nanopłynami oraz w zakresie innych parametrów pracy termosyfonu,
- rozdzielenie wpływu nanocząstek od wpływu substancji stabilizujących zawiesinę na pracę termosyfonu,
- wpływ nanopłynów o właściwościach płynów nienewtonowskich na pracę termosyfonu,
- badanie długoterminowego zachowania nanopłynów w odniesieniu do ich właściwości i efektywności podczas pracy w termosyfonach.

6. Wartości użytkowe pracy

Ciągły wzrost kosztów energii i materiałów konstrukcyjnych oraz konkurencja na rynku gotowych wyrobów wymuszają konieczność projektowania i budowy wysokosprawnych urządzeń wymiany ciepła. Pociąga to za sobą konieczność poszukiwania nowych sposobów intensyfikacji wymiany ciepła. Prezentowana rozprawa doktorska znakomicie wpisuje się w ten priorytetowy trend badań. Rozpoznanie metody intensyfikacji wymiany ciepła przez wykorzystanie nanopłynów w termosyfonach może być z powodzeniem wykorzystane przez producentów tych urządzeń. Uzyskany wzrost wartości ciepła przenoszonego przez termosyfon pozwala projektować urządzenia wymiany ciepła o mniejszych gabarytach.

Ciągły postęp w nanotechnologii sprawia, że produkcja nanopłynów może stać się procesem na tyle powszechnym, że koszty wytworzenia nanopłynu mogą ulec obniżeniu do poziomu, który sprawi, że wykorzystanie nanopłynów w układach wymiany ciepła stanie się codziennością. Niniejsza praca daje podwaliny do opracowania technologii wytwarzania termosyfonów wykorzystujących nanopłyny jako cieczy robocze. Termosyfon, którego celem jest długoterminowy i bezobsługowy „transport ciepła” wymaga stabilnych cieczy roboczych o właściwościach zapewniających osiągnięcie wyższych efektywności energetycznych niż dotychczas stosowane cieczy. Prezentowana rozprawa wnosi istotny wkład do działań podej-

mowanych w renomowanych jednostkach naukowo-badawczych zmierzających do podnoszenia sprawności i wydajności urządzeń wymiany ciepła, w tym termosyfonów.

7. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Rozdział 5 dotyczy badań własnych Doktorantki. W rozdziale 5.1 przedstawiono zdjęcie stanowiska badawczego oraz schemat sekcji badawczej. Brak jest schematu lub opisu całego stanowiska, stąd niejasne jest: czy, jak wynika ze zdjęcia, gdzie wyszczególniono tylko jeden przepływomierz, woda wspomagająca proces wrzenia oraz skraplania w termosyfonie krążyła w jednym obiegu z dwoma ultratermostatami, czy w dwóch oddzielnych obiegach?
2. Błąd pomiaru temperatury wynosił (w zależności od termometru) ponad $\pm 0,2$ K, a w innym przypadku ponad $\pm 0,3$ K. Czym uzasadnione jest podawanie w pracy wyników pomiaru temperatury z dokładnością do 0,01 K?
3. Temperatura wody doprowadzanej do węzownicy przy parowniku termosyfonu wynosiła według pomiaru w ultratermostacie 85°C , gdy na wejściu do węzownicy parownika już tylko $80,56^{\circ}\text{C}$ (str. 75). Czy podawanie np.: w opisie punktów charakterystyki, że temperatura „sekcji parownika” wynosiła 85°C nie będzie mylące dla osób wykorzystujących wyniki Doktorantki, np.: do analiz porównawczych. Informacja podana w rozprawie doktorskiej, z różnych powodów, może nie zostać podana w innych publikacjach;
4. Z wykresu 5.3 wynika, że zmiana strat ciepła w termosyfonie (wyrażona w procentach), gdy czynnikiem roboczym była woda, malała od wartości +5% do -5%, zaś w identycznych warunkach cieplnych, lecz innej serii pomiarowej, była stała i wynosiła około -4% (rys. 5.5). Czy należy wnioskować, że w jednym przypadku otaczające powietrze dogrzewało ciecz chłodzącą skraplaczu, zaś w kolejnym już nie?;
5. Krzywe wrzenia (rys. 5.14 - 5.17) obrazują proces jednofazowej wymiany ciepła, jak i dwufazowej wymiany ciepła. Interesujące byłoby wskazanie tych obszarów/punktów na wykresach, gdyż zdaniem recenzenta, daje się na nich zauważyć (a przez to potwierdzić) zjawisko zerowego kryzysu wrzenia w termosyfonie pracującym z wykorzystaniem wody, jak i roztworu środka powierzchniowo czynnego (SDS solution) oraz nanopłynu na bazie tlenku grafenu ze środkiem powierzchniowo czynnym (GO + SDS);
6. str. 12, w₁₅₋₁₇ - odwrotnie podano w nawiasach rodzaj płynu: newtonowski / nie-newtonowski.

Uwagi edytorskie

Praca została napisana w języku angielskim. Recenzent, jako że nie jest specjalistą w tym zakresie, nie podejmuje się szczegółowej oceny edytorskiej recenzowanej rozprawy doktorskiej. Należy jednak zauważyć, że przedstawiony tekst był zrozumiały, zdania sformułowane prawidłowo zaś specjalistyczna nomenklatura właściwa dla podjętej tematyki. Mimo że tekst został przygotowany z wyjątkową starannością można napotkać drobne niedociągnięcia:

- tekst jest w całości przygotowany w języku angielskim, ale na stronie tytułowej znajduje się zwrot w języku polskim „prof. uczelni”;
- rozdział pierwszy zawiera tylko jeden podrozdział. Brak innych podrozdziałów jest tym samym, czym dokonanie podziału na podpunkt „a” bez podpunktu „b” lub kolejnych;
- nagminnie rysunek wyprzedza tekst, w którym się na ten rysunek powołano (np.: rys. 28 znajduje się na początku strony, gdy jest przywołany dopiero w 8 wierszu od końca

strony). Stąd bardzo często czytelnik widzi rysunek i próbuje go połączyć z właśnie czytany tekst. Zrozumienie aktualnej treści materiału jest utrudnione zwłaszcza, gdy rysunek znajduje się w rozdziale jeszcze nie związanym tematycznie z jego przeznaczeniem (np.: rys. 2.9 dotyczy napięcia powierzchniowego, a znajduje się jeszcze w rozdziale poświęconym ciepłu właściwemu, rys. 3.9 dotyczy wrzenia środków powierzchniowo czynnych, a znajduje się w rozdziale poświęconym wrzeniu gejzerowemu). Rysunek 4.15 wyprzedza 2 ! rozdziały;

- wzór powinno traktować się jako część zdania, stąd, gdy jest on ostatnim wyrażeniem w zdaniu powinna za nim znajdować się kropka (np. po wzorze 3.2). Gdy zdanie jest kontynuowane powinno się, za wzorem, postawić przecinek i kontynuować zdanie z małej litery. Zdanie rozpoczyna się z wielkiej litery po kropce, więc wielka litera w środku zdania jest błędem nie tylko edytorskim lecz też ortograficznym. Tak więc po wzorach (2.2), (2.3), (2.4), (2.5) i wszystkich kolejnych powinien znajdować się przecinek, a następujące słowo (np. „Where”) powinno być pisane z małej litery („where”);
- str. 29, w^{10} – jest „hest flux”, powinno być „heat flux”;
- str. 30, w_5 – jest „followinf”, powinno być „following”;
- str. 47 – ostatnie zdanie powinno być napisane w formie bezosobowej (jest „my study”);
- str. 49 – we wzorze (3.10) nie występuje v_{fg} ;
- str. 61, w^9 – jest „Fig. 4.7 (left)...” gdy na rys. 4.7 jest rys. a i b (odpowiednio górny i dolny);
- str. 66, w_7 – jest „...was 1 g/l”, powinno być „0,1 g/l”;
- str. 90 – rys. 5.21 – brak jest powołania na ten rysunek w tekście.

8. Uwagi końcowe

Warunkiem dysertabilności rozprawy doktorskiej jest jej związek z problemem poznawczym bezpośrednio lub pośrednio wpływającym na stan wiedzy. Związek ten powinien umożliwić doktorantowi dogłębne poznanie metodologii badań oraz stworzyć podstawy do dalszego rozwoju w kierunku osiągnięcia pełnej samodzielności naukowej. W przypadku recenzowanej rozprawy warunki te zostały spełnione. Rozprawa napisana jest poprawnie, gdyż występują w niej elementy, które w metodologii nauk ścisłych określa się jako etapy badania naukowego.

Przedstawioną do oceny rozprawę oceniam jako pracę wartościową, zawierającą bardzo bogaty, interesujący poznawczo materiał badawczy. Podsumowując stwierdzam, że rozprawa Pani mgr inż. Agnieszki Kujawskiej:

- potwierdza jej bardzo wysoki poziom wiedzy w obszarze materiałoznawstwa, mechaniki płynów, termodynamiki oraz wymiany ciepła stanów ustalonych oraz nieustalonych,
- stanowi oryginalne osiągnięcie poprzez rozwiązanie wielu nowych, aktualnych tematycznie zagadnień naukowych,
- wykazuje umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych.

Podane w recenzji uwagi krytyczne mają charakter informacyjny. Uwagi te nie pomniejszają wartości naukowej opiniowanej pracy, którą pod kątem merytorycznym oceniam bardzo wysoko. Wyniki przeprowadzonych badań zyskały również uznanie recenzentów międzynarodowych, o czym mogą świadczyć liczne artykuły Doktorantki opublikowane w czasopiśmie o najwyższej randze naukowej.

9. Wniosek do Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętność wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu szeroko rozumianej energetyki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych i ich opracowaniu. Praca stanowi olbrzymi, oryginalny wkład do badań nad problemem intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonie. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Agnieszki Kujawskiej jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i dopuszczeniu jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy, istotny wkład Doktorantki w postęp wiedzy na temat możliwości wykorzystania nanopłynów w termosyfonach oraz umiędzynarodowienie uzyskanych wyników badań wnioskuje o jej wyróżnienie.



9. Wniosek do Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorantka wykazała się umiejętnością rozwiązywania problemów badawczych przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazała także umiejętność wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu szeroko rozumianej energetyki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych i ich opracowaniu. Praca stanowi olbrzymi, oryginalny wkład do badań nad problemem intensyfikacji wymiany ciepła w termosyfonie. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Agnieszki Kujawskiej jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku i dopuszczeniu jej do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy, istotny wkład Doktorantki w postęp wiedzy na temat możliwości wykorzystania nanopłynów w termosyfonach oraz umiędzynarodowienie uzyskanych wyników badań wnioskuję o jej wyróżnienie.

