

dr hab. inż. Robert Pastuszko, prof. uczelni
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
Al. Tysiąclecia P.P. 7
25-314 Kielce
tel.: (41) 3424716
e-mail: tmprp@tu.kielce.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisławy Hałon
pt. *Charakterystyka wysokotemperaturowego procesu wrzenia czynników chłodniczych
w mikrokanalach*

1. Charakterystyka ogólna

Opiniowana praca dotyczy wymiany ciepła podczas wrzenia czynnika R245fa w zakresie temperatur od 40 do 85⁰C. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone zarówno dla wrzenia w przepływie, jak też w odniesieniu do wrzenia w dużej objętości (badania referencyjne).

Praca ma charakter badań podstawowych, co uważam za szczególnie godne podkreślenia, jak również użyteczny – wyniki mogą być zastosowane do projektowania układów chłodzenia podzespołów elektronicznych, pracujących, jak określiła to Autorka, „w trudnych warunkach”.

Skutecznym sposobem chłodzenia zminiaturyzowanych układów elektronicznych jest zastosowanie konwekcji wymuszonej ze zmianą fazy, umożliwiającej uzyskania dużych gęstości strumienia ciepła przy niewielkich przegrzaniach i stosunkowo małej powierzchni wymiany ciepła, co przekłada się na możliwość otrzymania wysokich wartości współczynnika przejmowania (wnikania) ciepła (HTC). Uzyskiwane współczynniki przejmowania ciepła są nawet kilkudziesięciokrotnie wyższe w porównaniu z konwekcją wymuszoną bez zmiany fazy. Mimo wysiłków wielu pokoleń badaczy mechanizm wrzenia w przepływie nie został w pełni opisany. Badania i modele opisane w dostępnej literaturze skupiają się przeważnie na analizie wrzenia dla czynników chłodniczych o temperaturach nasycenia poniżej 40⁰C, co ogranicza zastosowanie przedstawianych metod obliczeniowych. Doktorantka słusznie wskazała konieczność uzupełnienia wiedzy w odniesieniu do badań przy wyższych temperaturach, tj. 45 – 85⁰C. Poszukiwane metody i rozwiązania aplikacyjne są związane z minimalizacją powierzchni wymiany ciepła oraz maksymalizacją współczynników przejmowania ciepła.

Intensyfikacja wymiany ciepła podczas wrzenia odgrywa dużą rolę np. w urządzeniach klimatyzacyjnych, kompaktowych wymiennikach ciepła, mikroelektronice oraz układach związanych z napędem hybrydowym pojazdów samochodowych. Doktorantka słusznie zauważyła, że przesuwa się granica temperatur, w których pracują komponenty elektroniczne, co powoduje konieczność wytwarzania układów chłodzenia wykorzystującego tzw. wrzenie wysokotemperaturowe, rozumiane jako wrzenie w temperaturze nasycenia przekraczającej 40⁰C.

Głównym celem opiniowanej pracy doktorskiej było przeprowadzenie badań eksperymentalnych umożliwiających określenie dominującego mechanizmu wymiany ciepła oraz jego związku ze strukturą przepływu podczas przepływu wrzącego czynnika chłodniczego przez mikrokanaly. Za dodatkowy cel Doktorantka przyjęła sprawdzenie możliwości aplikacyjnych proponowanego wymiennika ciepła.

2. Opis pracy

Rozprawa przedstawiona jest na 167 stronach maszynopisu formatu A4 w języku polskim, z czego 43 strony stanowią dodatki i bibliografia. Na pracę składają się 4 rozdziały numerowane, poprzedzone streszczeniem, spisem treści, rysunków, tabel i oznaczeń, wprowadzeniem, przedstawieniem celu naukowego oraz rozdziałem *Teza, cel, zakres i metody badań*, jak również 3 dodatki i wykaz literatury. Zawarto w niej 64 rysunki, 12 tabel i 148 zacytowanych pozycji bibliograficznych, w większości publikacji w czasopismach w języku angielskim (w tym 2 pozycje, których współautorką jest Doktorantka). Tytuły poszczególnych rozdziałów numerowanych są następujące: (1) Wrzenie przy przepływie przez mini oraz mikrokanały – stan wiedzy, (2) Wrzenie pęcherzykowe, (3) Wrzenie w przepływie – eksperyment, (4) Wrzenie w przepływie – modelowanie.

Przegląd literatury związanej z wrzeniem przy przepływie jest zawarty w pierwszym rozdziale, natomiast stan wiedzy dotyczący wrzenia pęcherzykowego zajmuje około 12 stron drugiego rozdziału. Treść związana z przeglądem literatury, zawarta w ww. rozdziałach, obejmuje około 45% objętości pracy, co może się wydawać zbyt obszerne. Autorka przeanalizowała jednak nie tylko szeroki zakres zagadnień związanych ze strukturami przepływu i mechanizmami wrzenia w mikrokanalach, lecz także włożyła dużo pracy w szczegółowe omówienie wyników eksperymentów 11 zespołów badawczych, wskazując zakresy badań i najważniejsze wnioski. Wzorowo opracowana została synteza omawianych badań z ciekawym graficznym przedstawieniem zachowania współczynnika przejmowania ciepła w funkcji stopnia suchości pary w odniesieniu do zmian gęstości strumienia ciepła oraz gęstości strumienia masy. Dodatkowo dokładnie omówiono wpływ wymiarów kanału i temperatury na intensywność wymiany ciepła i dominujący mechanizm wymiany ciepła. Autorka wykazała się dużą dojrzałością zwracając uwagę na fizyczną stronę skomplikowanych mechanizmów wymiany ciepła przy zmianie fazy w mikrokanalach. Podział przeglądu literatury jest spójny i bezpośrednio związany z tematyką własnych badań, przedstawianych w kolejnych rozdziałach. Na podkreślenie zasługuje bardzo dokładnie przeprowadzona analiza modeli wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie. Autorka rozpatrywała 24 modele, przedstawione w publikacjach z lat 1966 – 2016, dzieląc je na cztery grupy (addytywne, asymptotyczne, związane z wyznaczeniem liczby Nusselta oraz fenomenologiczne). Przejrzyste graficzne porównanie tych modeli zaprezentowała na wykresach w postaci zależności współczynnika przejmowania ciepła od stopnia suchości dla wybranych z literatury danych eksperymentalnych, przy czym przeanalizowała również dokładność poszczególnych modeli. Pierwszy rozdział kończy się obszernym podsumowaniem omawianych zagadnień.

Drugi rozdział dotyczy wrzenia pęcherzykowego. Doktorantka wychodzi ze słusznego założenia, że mechanizm wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie jest związany z konwekcją wymuszoną, wynikającą z przemieszczania czynnika, oraz wrzeniem pęcherzykowym w tzw. dużej objętości. Pierwsza część tego rozdziału dotyczy przeglądu zagadnień wrzenia pęcherzykowego czynników niskociśnieniowych (R245fa i R236fa), omówienia sposobu obliczania sił działających na odrywający się pęcherz parowy, jak również średnicy i częstotliwości. Przegląd ten jest uzupełniony przedstawieniem podstawowych mechanizmów wymiany ciepła dla pęcherza parowego, parametrów wpływających na wrzenie pęcherzykowe oraz zależności umożliwiających wyznaczenie współczynników przejmowania (wnikania) ciepła. To spójne omówienie zawiera najważniejsze informacje, niezbędne do zrozumienia skomplikowanych zagadnień związanych z wymianą ciepła podczas wrzenia w dużej objętości. Druga część omawianego rozdziału dotyczy własnych badań eksperymentalnych, związanych z wyznaczeniem krzywych wrzenia w dużej objętości czynnika R245fa na powierzchni gładkiej. Te badania Autorka traktowała jako pomiary referencyjne. Opisane zostało stanowisko pomiarowe i metodyka badań. Pomiary wykonywane przy różnych ciśnieniach umożliwiły wyznaczenie

krzywych wrzenia dla temperatur nasycenia 40, 50, 60 i 70°C. Własne dane eksperymentalne porównano z obliczeniami wykonanymi dla 8 modeli teoretycznych (korelacji) oraz zaproponowano modyfikację modelu Rohsenowa poprzez zoptymalizowanie stałej związanej z materiałem powierzchni grzejnej i rodzajem czynnika wrzącego.

Rozdział 3 dotyczy badań własnych wrzenia w przepływie na powierzchni z 10 mikrokanalami o szerokości i wysokości 1 mm. Eksperymenty przeprowadzono dla temperatur nasycenia 49, 63 i 82°C, przy różnych wydatkach masowych i gęstościach strumienia ciepła. Doktorantka skupiła się na ustaleniu zależności między współczynnikiem przejmowania ciepła a stopniem suchości pary, gęstością strumienia masy, strumieniem ciepła, temperaturą nasycenia. Na podstawie uzyskanych wyników dokonała identyfikacji dominującego mechanizmu w zależności od charakteru przepływu oraz rejestracji struktury przepływu dwufazowego w kanałach przy pomocy kamery szybkoobrotowej. Analizując wykonane zdjęcia Autorka opracowała mapy struktur przepływu oraz sprawdziła czy istnieje związek między strukturami przepływu a dominującym mechanizmem wymiany ciepła. Warto podkreślić, że pomiary porównano z wrzeniem w dużej objętości oraz z omawianymi wcześniej 24 modelami wrzenia w przepływie. Ta żmudna praca dała możliwość określenia modeli pozwalających na uzyskanie najlepszej dokładności. Rozdział zakończony jest obszernym podsumowaniem.

Rozdział 4 opisuje propozycję modyfikacji modelu Saitoha i in. dla powierzchni z mikrokanalami pod kątem przepływu wrzącego czynnika R245fa przy różnych temperaturach nasycenia. Doktorantka zaproponowała własne zależności na współczynniki poprawy i tłumienia. Do oceny dokładności stworzonej modyfikacji wykorzystano kryterium ilościowe i jakościowe. Warte uznania jest zastosowanie autorskiego kryterium bazującego na geometrii analitycznej, umożliwiającego ocenę stopnia odwzorowania charakteru zależności współczynnika przejmowania ciepła od stopnia suchości.

Praca uzupełniona jest 3 dodatkami. Dodatek A obejmuje dokładny opis 24 analizowanych w rozdziale pierwszym modeli wrzenia w przepływie, dodatek B dotyczy badań przepływu jednofazowego, a dodatek C pokazuje sposób wyznaczania niepewności pomiarowych w odniesieniu do 12 analizowanych parametrów termodynamicznych bądź wielkości fizycznych.

Rozprawa kończy się dokładnym, pięciostronicowym podsumowaniem, które sprawia wrażenie zbyt szczegółowego i nadmiernie rozbudowanego.

Warto zaznaczyć, że pomiary przeprowadzono na dwóch stanowiskach badawczych:

- wpływ temperatury nasycenia oraz gęstości strumienia ciepła na wrzenie objętościowe przeprowadzono na stanowisku znajdującym się w laboratorium Zakładu Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej.
- wrzenie podczas przepływu przez mikrokanaly badano na stanowisku znajdującym się w Laboratorium Intensyfikacji Przepływów Dwufazowych przy Wydziale Mechaniczno-Energetycznym Politechniki Wrocławskiej.

Biorąc pod uwagę przeprowadzoną przez Doktorantkę analizę stanu wiedzy w wyżej opisanej tematyce, wyniki badań własnych oraz sformułowane cele pracy dotyczące charakterystyki wysokotemperaturowego procesu wrzenia podczas przepływu czynnika chłodniczego w mikrokanalach, uważam, że:

- Podjęcie prezentowanej tematyki jest w pełni uzasadnione z poznawczego punktu widzenia, jak też i praktyki inżynierskiej,
- Przedstawiona teza pracy: *Dla wysokotemperaturowego wrzenia w mikrokanalach dominującym mechanizmem wymiany ciepła jest wrzenie pęcherzykowe. Mechanizm ten przeważa niezależnie od struktury przepływu występującej w kanale. W warunkach podwyższonej temperatury wzrost wartości współczynnika wnikania ciepła można*

uzyskać poprzez zwiększenie temperatury nasycenia oraz gęstości strumienia ciepła przy jednoczesnym zmniejszeniu prędkości czynnika została poprawnie sformułowana.

Autorka bardzo skrupulatnie udokumentowała metodykę pomiarową. Ze względu na specyfikę stanowisk pomiarowych zastosowano odmienną metodę wyznaczania gęstości strumienia ciepła, co może rodzić pewne wątpliwości odnośnie porównywania uzyskiwanych wyników. Dla każdego ze stanowisk przeprowadzono analizę błędów pomiarowych. Na uwagę zasługuje wykonanie przez Doktorantkę dokładnego porównania uzyskanych danych eksperymentalnych dla wrzenia w objętości i w przepływie z dostępnymi równaniami korelacyjnymi lub zależnościami. Z dużym uznaniem należy przyjąć, że utworzona baza wartości współczynników przejmowania ciepła dla wrzenia w przepływie R245fa i R236fa, uzupełniona o własne dane eksperymentalne, posłużyła opracowaniu modyfikacji jednego z modeli wrzenia w celu poprawy dokładności dla danych wykazujących malejącą zależność HTC od stopnia suchości pary.

3. Błędy i nieścisłości

W przedstawionej do oceny pracy znalazłem nieliczne nieścisłości merytoryczne lub z zakresu zastosowanej terminologii oraz pewne błędy edycyjne, jak również stylistyczne i gramatyczne. Niektóre z przedstawionych wykresów wymagają poprawy czytelności poprzez powiększenie czcionek w opisie osi i legendzie oraz zastosowanie większych znaczników. Uwagi te jednak nie wpływają na całościową ocenę merytoryczną, która świadczy, że Doktorantka wykonała pracę doktorską na odpowiednim poziomie naukowym z wykorzystaniem aktualnych metod i technik badawczych.

Poniżej przedstawiam wyszczególnienie reprezentatywnych przykładów ww. błędów oraz i nieścisłości:

- powtórzenia wyrazów lub całych fraz:
 - str. 1: *...dużo większymi wartościami...oraz dużym ciepłem przemiany pozwala na odprowadzenie dużych ilości..*
 - str. 121: *Ta część przeglądu pozwoliła ... Ta część przeglądu ujawniła...*
 - str. 123: *Chłodzenie elektroniki dedykowanej do pracy w trudnych warunkach... 5 wierszy dalej: z punktu widzenia chłodzenia elektroniki dedykowanej do pracy w trudnych warunkach...*
- błędy stylistyczne, gramatyczne lub interpunkcyjne, które utrudniają zrozumienie sensu niektórych zdań, kilka przykładów:
 - *mikro kanał* – poprawna jest pisownia łączna, tj. *mikrokanal* (edytor Word niepoprawnie zaznacza taka pisownię jako błąd: w języku polskim wszystkie przedrostki – rodzime i obce – pisze się łącznie z wyrazami pospolitymi, chyba że drugi człon jest nazwą własną i pisany jest wielką literą – wtedy po przedrostku używamy łącznika), występuje ponad 120 razy w całym tekście pracy;
 - str. 57, uwaga j.w.: *mikro konwekcję* zamiast *mikrokonwekcję*, *mikro warstwy* zamiast *mikrowarstwy*;
 - str. 26: *Analiza Rysunku1.14...* - raczej analiza wykresów przedstawionych na rysunku;
 - str.2: *Pierwszy parametr poprzez zmianę właściwości czynnika roboczego przekładającą się na zwiększenie...* - całe zdanie jest nieczytelne, gdyż brakuje w nim orzeczenia;
 - str. 121: *Analiza otrzymanych wyników pozwoliła wywnioskować...*
- najważniejsze uwagi dotyczące formatowania tekstu na wykresach:
 - nieścisłością jest używanie czcionek prostych lub pochylonych na oznaczenie tej samej wielkości fizycznej, czego przykładem jest oznaczenie pismem prostym

- wielkości L i x , umieszczonych na rys. 3.9 – 3.21, chociaż w spisie oznaczeń i symboli ww. wielkości fizyczne oznaczono czcionkami pochyłymi (tzw. kursywą);
- na wykresach (Rys. 3.10 – 3.21) na oddzielenie części dziesiętnych w liczbach stosowano zamiennie przecinki lub kropki, co jest błędem, gdyż w języku polskim powinno się stosować oddzielenie części dziesiętnych przecinkiem;
 - w nagłówkach wykresów (Rys. 3.9 – 3.21) brakuje znaku „=” pomiędzy symbolami wielkości fizycznych lub parametrów a liczbą; dodatkowo przy braku przecinków lub większej spacji pomiędzy jednostką a symbolem kolejnej wielkości sposób zapisu staje się mało czytelny;
 - mała czytelność wykresów na Rys. 1.15 – zbyt mała czcionka na opisach osi, jednostek i legendy.
- stosowanie niepoprawnych terminów:
 - angielskich: zamiast *dryout* (np. str. 14) powinien być stosowany polski termin *wysuszenie*;
 - polskich: zamiast *przegrzew* (np. str. 60) powinno być *przegrzanie* lub *stopień przegrzania*.
 - zauważone błędy dotyczące oznaczeń:
 - str. xviii: błędy pisowni nazwisk w opisie liczb podobieństwa: jest Freude’a zamiast Froude’a, jest Jacoba – powinno być Jakoba
 - w podpisie rysunku 4.3 jest mowa o liczbie wrzenia BO , natomiast na wykresie na osi rzędnych pojawia się oznaczenie Bo , czyli liczba Bonda
 - w spisie oznaczeń ciepło właściwe oznaczone jest jako c_p , natomiast we wzorze (2.18) występuje oznaczenie wielką literą jako C_p ;
 - w spisie oznaczeń ciśnienie oznaczone jest jako P , natomiast we wzorze (1.20) występuje oznaczenie ciśnienia nasycenia małą literą jako p_{sat} ;
 - w spisie oznaczeń temperatura oznaczona jest małą literą t , natomiast we wzorze (2.18) występuje oznaczenie temperatury nasycenia wielką literą jako T_{sat} ;
 - współczynnik przejmowania (wnikania) ciepła HTC we wzorze (2.24) pisany jest zarówno czcionką prostą, jak również kursywą; zapis kursywą pojawia się również w zdaniu pod ww. wzorem, przy czym w innych wzorach i spisie oznaczeń widnieje zapis czcionką prostą.
 - nieprawidłowy zapis jednostek:
 - niepewności pomiarowe temperatury ścianki i temperatury nasycenia powinny być podane w K;
 - moduł żebra, a raczej parametr żebra mo w rozdziale *Symbole* (str. xvi) jest błędnie oznaczony jako wielkość bezwymiarowa – w rzeczywistości ma wymiar $1/m$.
 - nieścisłości merytoryczne:
 - sprawa dyskusyjna: czy termin *korelacja* nie powinien być zastąpiony *równaniem korelacyjnym* lub *równaniem kryterialnym*;
 - str. 1 (*Wprowadzenie*) – pomylenie współczynnika przejmowania (wnikania) ciepła z gęstością strumienia ciepła;
 - str. 5 (*Cele badawcze*) – brak informacji, jaką temperaturę ma na myśli Autorka (nasycenia czy powierzchni grzejnej);
 - rozdz. 1.4 – przy szczegółowym omówieniu wyników badań nie zawsze podawano jaki był kształt kanału;

- rozdz. 2.2.1. – odniesienie się do jednej publikacji [9] z roku 1977 jest mało wartościowe ze względu na dużą ilość publikacji dotyczących sił działających na odrywający się pęcherz, które pojawiły się w ostatnich latach;
- str. 56 – brakuje podania podstawowej relacji (np. Jakoba lub Zuber) między częstotliwością i średnicą odrywającego się pęcherza w postaci $f_d D_d = \text{const.}$, której właśnie dotyczy ostatnie zdanie w rozdz. 2.2.2;
- wzór (2.26) powinien przedstawiać bezpośrednio zależność na temperaturę powierzchni grzejnej z wyjaśnieniem, że jest ona wynikiem ekstrapolacji odczytu z czujnika rezystancyjnego; podobna uwaga dotyczy zależności (3.8);
- schemat stanowiska (rys. 2.7) jest zbyt mały i zawiera niewiele informacji o szczegółach konstrukcyjnych;
- w tabeli 2.2 nie podano niepewności wyznaczenia strumienia ciepła $u(Q)$, co jest niezbędne do określenia niepewności gęstości strumienia ciepła; również nie podano niepewności $u(t_{PT100})$;
- przy wzorze (4.12) powinna być adnotacja, że jest to zależność Dittusa-Boeltera.
- najważniejsze uwagi dot. tabel:
 - bardzo małe czcionki w tabelach 1.1 – 1.3 utrudniają czytelność tekstu.
- bibliografia:
 - brak pełnego uporządkowania spisu literatury: pojawiają się pełne imiona lub pierwsze litery imion.

4. Zagadnienia do dyskusji

Zdaniem recenzenta, Doktorantka winna odnieść się do następujących kwestii i ewentualnie wyjaśnić pewne nieścisłości, które pojawiły się w tekście:

1. Termin „trudne warunki” jest wstępnie wyjaśniony w odniesieniu do podzespołów na str. 2 we *Wprowadzeniu*. Czy podane ograniczenie temperatury otoczenia również dotyczy *Chłodzenia elektroniki dedykowanej do pracy w trudnych warunkach*, o czym jest mowa w *Podsumowaniu* na str. 123 ?
2. W rozdziale 2 powinna pojawić się tabela z parametrami termodynamicznymi czynnika R245fa oraz czynnika R236fa, o którym również jest mowa w przeglądzie literatury, dla temperatur nasycenia w zakresie 40 – 70 °C. Umożliwiłoby to czytelnikowi porównanie np. ciepła parowania i in. parametrów z parametrami np. czynnika Novec-649, który posiada temperaturę nasycenia 49°C przy ciśnieniu atmosferycznym.
3. Autorka podaje na stronie 64, że górna wartość strumienia ciepła wynikała z ograniczeń grzałki, co powodowało, że nie przekraczano gęstości strumienia ciepła 65 kW/m². Na podstawie krzywych wzrzenia z rys. 2.9 można wyznaczyć maksymalne przegrzania dla $q=65 \text{ kW/m}^2$, które wynoszą 19 – 26 K, co oznacza, że temperatura powierzchni grzejnej wynosiła od 66°C do 89°C, czyli temperatura samej grzałki mogła być wyższa o około 20 – 30 K (nie ma informacji odnośnie wysokości płyty grzejnej). Czy były jeszcze jakieś inne przyczyny ograniczenia gęstości strumienia ciepła na stanowisku, ponieważ osiągnęte temperatury grzałki były stosunkowo niewielkie ?
4. Czy dla najmniejszej stosowanej gęstości strumienia ciepła, $q=30 \text{ kW/m}^2$, uzyskano przegrzania odpowiadające początkowi wrzenia pęcherzykowego (ONB) ?
5. Z niewiadomych powodów na stanowisku (rys. 2.7) nie zastosowano czujnika do pomiaru temperatury nasycenia, a warto byłoby porównać ciśnienie odpowiadające zmierzonej temperaturze pary/cieczy nasyconej z odczytem ciśnienia z przetwornika.

6. Czy autorka porównywała dane literaturowe dotyczące uzyskiwanych wartości HTC przy wrzeniu w objętości dla czynnika R245fa? Takie porównanie przy podobnej powierzchni i zbliżonych wartościach przegrzania i temperatury nasycenia byłoby bardzo wartościowe.
7. Doktorantka porównała współczynniki przejmowania (wnikania) ciepła uzyskane przy wrzeniu w przepływie i dużej objętości (Rys. 3.15). Niestety porównywane są różne powierzchnie: dla wrzenia w przepływie układ mikrokanałów, natomiast wrzenie objętościowe odbywa się na gładkiej, płaskiej powierzchni. Zastosowanie rozwinięcia powierzchni (układu mikrokanałów) z pewnością skutkowało by znacznym zwiększeniem przede wszystkim gęstości ośrodków nukleacji oraz zmniejszeniem przegrzania, co przyczyniłoby się do powiększenia współczynnika przejmowania ciepła. Można przypuszczać, że uzyskane zwiększenie HTC dla wrzenia objętościowego byłoby co najmniej dwu lub trzykrotne, a więc otrzymane współczynniki przejmowania ciepła byłyby porównywalne z HTC dla wrzenia w przepływie. Proszę o komentarz.
8. Widoczność poszczególnych struktur przepływu (Rys. 3.16) nie jest najlepsza. Czy nie można było zastosować powiększenia, nawet kosztem zmniejszenia rozdzielczości ?
9. Zależność (3.26) wymaga dodatkowego opisu.
10. Każdy rozdział kończy się podsumowaniem, co jest jak najbardziej godne pochwały, natomiast kończący rozprawę rozdział *Podsumowanie* powinien mieć nazwę *Podsumowanie końcowe* lub *Wnioski końcowe*.

5. Ogólna ocena pracy

Mimo pewnej ilości drobnych uchybień w przygotowanej pracy, należy podkreślić, że Doktorantka posiada wiedzę z zakresu wymiany ciepła podczas wrzenia objętościowego oraz przy przepływie, którą może wykorzystać w procesie optymalizacji konstrukcji wysokowydajnych wymienników ciepła.

Należy podkreślić, że mgr inż. Stanisława Hałon przeprowadziła bardzo obszerne badania eksperymentalne i teoretyczne dotyczące dwóch wariantów wymiany ciepła przy wrzeniu. Znaczącym osiągnięciem pracy jest opracowanie modelu wrzenia w warunkach zwiększonego ciśnienia podczas przepływu czynnika chłodniczego R245fa przez powierzchnię rozwiniętą. Są to nowe wyniki, pozwalające lepiej zrozumieć mechanizm wysokotemperaturowego procesu wrzenia. Pragnę podkreślić, że praca jest przejrzysta, dobrze zredagowana, z właściwie dobranym materiałem ilustracyjnym.

6. Podsumowanie

Przedłożona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Przedstawione przez Doktorantkę wyniki badań dotyczące procesu wrzenia objętościowego i w przepływie czynnika chłodniczego przez mikrokanały przy zmiennych ciśnieniach są nie tylko obszerne, ale także wartościowe z punktu widzenia naukowego i aplikacyjnego.

W prowadzonych badaniach eksperymentalnych, przy opisie wyników badań oraz ich analizie Doktorantka wykorzystwała właściwe metody naukowe oraz wykazała dobrą znajomość zagadnień z zakresu wymiany ciepła.

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktorantkę problemu naukowego. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* oraz świadczy dostatecznie o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydatki, a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w tej dyscyplinie.

Reasumując, uważam, że praca doktorska mgr inż. Stanisławy Hałon pt. *Charakterystyka wysokotemperaturowego procesu wrzenia czynników chłodniczych w mikrokanałach* spełnia warunki określone w art. 13 ustawy *O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz*

stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pani mgr inż. Stanisławy Hałon do jej publicznej obrony.

Robert Pestusko