

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Strąk nt.:

„Badania intensyfikacji wrzenia  
podczas przepływu przez minikanaly prostokątne”

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 07. 01. 2019 (Uchwała Rady Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 20. 12. 2018 r.).

Promotorem pracy jest dr hab. inż. Magdalena Piasecka, profesor Politechniki Świętokrzyskiej, zaś promotorem pomocniczym dr hab. Beata Maciejewska, profesor Politechniki Świętokrzyskiej.

### 1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa zawiera 2015 stron podzielonych na dziesięć rozdziałów. Są to:

1. **Wstęp**, w którym wykazano istotę oraz aktualność tematyki wrzenia cieczy roboczych w przepływie, zwłaszcza w kanałach o małym wymiarze pola przekroju poprzecznego, tzw. minikanalach. W dalszej części wstępu wprowadzono czytelnika w zagadnienia poruszane w kolejnych rozdziałach rozprawy.
2. **Przegląd literatury dotyczącej zagadnień związanych z procesami wrzenia** zawiera kompendium najnowszej wiedzy na temat klasyfikacji kanałów oraz metod wyznaczania podstawowych wielkości charakteryzujących wrzenie w przepływie. Szczególną uwagę zwrócono na metody pomiaru temperatury powierzchni grzejnej. Opisano zarówno proste, lecz wprowadzające zaburzenie pola temperatury metody kontaktowe, jak i wymagające indywidualnego podejścia oraz specjalnego wzorcowania metody optyczne. Poddano krytycznej ocenie metody intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie. Przybliżono powszechnie stosowane równania kryterialne do obliczania współczynnika przejmowania ciepła podczas jednofazowego i dwufazowego przepływu cieczy w kanałach konwencjonalnych oraz minikanalach.
3. **Teza pracy**.
4. **Cel i zakres badań**, w którym wymieniono właściwe cele i zakres opracowania.
5. **Badania eksperymentalne i procedura badawcza** zawiera opis stanowiska badawczego oraz wykaz modułów wchodzących w jego skład. Szczegółowo scharakteryzowano kształt i topografię minikanalów wykorzystywanych podczas właściwych badań wymiany ciepła.

6. Rozdział **Metody obliczeniowe stosowane do wyznaczenia lokalnego współczynnika przejmowania ciepła** zawiera szczegółowy opis dwóch metod wykorzystanych przez Doktorantkę do wyznaczenia współczynnika intensywności wymiany ciepła na granicy cieczi-ciało stałe (ścianka). Obie metody, zaliczane do grupy metod pośrednich, wymagają wyznaczenia pola temperatury powierzchni grzejnej mającej kontakt z przepływającym płynem. Doktorantka wykorzystowała jednowymiarową metodę bazującą na zjawisku przewodzeniu ciepła w ścianie przy założeniu, że na długości kanału gęstość strumienia ciepła jest wielkością stałą oraz dwuwymiarową metodę odwrotną bazującą na pomiarze pola temperatury zewnętrznej powierzchni grzejnej.
7. **Wyniki i analiza badań** jest najbardziej wartościowym rozdziałem recenzowanej pracy. Przedstawiono w nim wyniki badań własnych Doktorantki. Szeroko opisano wizualizację struktur przepływu dwufazowego, termografy powierzchni grzejnej uzyskane zarówno z pomiarów kamerą termowizyjną, jak i za pomocą ciekłych kryształów, graficznie zobrazowano profil temperatury na długości minikanalu oraz uzyskaną z obliczeń wartość stopnia suchości, stopnia zapełnienia, lokalnego współczynnika przejmowania ciepła na długości minikanalu, średniego współczynnika przejmowania ciepła w funkcji gęstości strumienia ciepła. Wielkości te uzyskano z pomiarów z wykorzystaniem kilku rodzajów cieczy roboczej, kilku rodzajów topografii powierzchni minikanalu, kilku głębokości minikanalu, kilku orientacji przestrzennych kanału podczas zwiększania, a następnie zmniejszania wartości gęstości strumienia ciepła na ścianie minikanalu. Wielowariantowe badania umożliwiły określenie wpływu wyżej wymienionych wielkości na intensywność procesu wymiany ciepła. Zebrany, w ogromnych ilościach, materiał badawczy wykorzystano do zaproponowania własnej korelacji do obliczenia bezwymiarowego współczynnika przejmowania ciepła – liczby Nusselta. Zaproponowana korelacja bazuje na czterech liczbach podobieństwa, odpowiednio: liczbie wrzenia  $Bo$ , liczbie Webera  $We$ , liczbie Prandtla  $Pr$  oraz liczbie Reynoldsa  $Re$ . Dokonano porównania wyników obliczeń teoretycznych z wykorzystaniem zaproponowanej zależności z wynikami badań własnych.
8. **Podsumowanie, wnioski i wytyczne do dalszych badań** to rozdział, w którym zebrano i przedstawiono syntetycznie wnioski wynikające z przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz zaproponowano kierunki działań zmierzających do dalszego pogłębienia wiedzy na temat możliwości intensyfikacji wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie.
9. **Bibliografia** – zawiera wykaz 202 cytowanych w dysertacji publikacji, z czego dużą ilość stanowią najnowsze artykuły zamieszczone w czasopismach wymienionych na liście A MNiSW. Jest wśród nich 19 publikacji współautorstwa Doktorantki, z czego niektóre z nich opublikowano w tak renomowanych czasopismach, jak: *Experimental Thermal and Fluid Science*, *Heat Transfer Engineering* czy *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
10. **Załączniki** stanowią integralną część pracy doktorskiej i zawierają, między innymi, szczegółowy opis każdego z systemów wchodzących w skład stanowiska badawczego (akwizycji danych, wizualizacji struktur przepływu, zasilania i kontroli, ...); własności fizycznych i termodynamicznych stosowanych cieczy roboczych; topografii minikanalów czy oceny dokładności wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła.

Dodatkowo w pracy podano wykaz ważniejszych oznaczeń oraz wykaz tabel i rysunków.

## 2. Teza pracy

W rozdziale trzecim Doktorantka podaje tezę swojej pracy w następującej formie: „*Na współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie przez prostokątny minikanal wywierają wpływ: parametry cieplno-przepływowe, geometria i orientacja przestrzenna minikanalu, rodzaj czynnika wrzącego i rozwinięcie powierzchni grzejnej*”.

Udowodnienie postawionej przez Doktorantkę tezy wymaga, jej zdaniem, zrealizowania badań, które swoim zakresem pomogą osiągnąć szczegółowe cele, jakimi są:

- „analiza procesu wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie kilku płynów roboczych przez minikanaly o przekroju prostokątnym” (wpływ wybranych parametrów cieplno-przepływowych, zmiennej geometrii i orientacji przestrzennej kanału),
- „wyznaczenie lokalnych wartości współczynnika przejmowania ciepła, zweryfikowanie wpływu powierzchni płyt grzejnych o różnym stopniu rozwinięcia i orientacji przestrzennej kanału oraz wybranych parametrów eksperymentalnych na intensyfikację procesu wrzenia”,
- „sformułowanie jednowymiarowej (1D) i dwuwymiarowej (2D) metody obliczeniowej, opisującej przepływ ciepła przez poszczególne elementy modułu pomiarowego, celem wyznaczenia lokalnych wartości współczynników przejmowania ciepła na styku płyta grzejna – płyn oraz propozycja własnego równania kryterialnego, opisującego wymianę ciepła przy wrzeniu podczas przepływu w minikanalach”.

## 3. Rozwinięcie tezy

W celu oceny poprawności postawionej przez Doktorantkę tezy należy zadać sobie pytanie: *co to jest teza?* W wielu źródłach można znaleźć odpowiedź, że: teza jest 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. Wniosek - sformułowanie podane przez Doktorantkę nie jest tezą, gdyż jest to stwierdzenie oczywiste. Powstaje więc pytanie: *jakie jest główne przesłanie recenzowanej pracy doktorskiej?* W odpowiedzi na tak postawione pytanie pomocne powinny być cele szczegółowe pracy, czyli wskazanie kierunków i zakresu badań, które mają wzbogacić wiedzę o zjawiskach będących przedmiotem badań. Trudno zatem się zgodzić ze stwierdzeniem Doktorantki, iż sformułowanie metody obliczeniowej poszerzy wiedzę na temat wpływu wielkości opisanych w „tezie” na wartość współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie. Powstaje zatem kolejne pytanie: *jaki faktycznie szczegółowe cele badawcze przyświecały Doktorantce realizującej recenzowaną rozprawę?* Dalsze studiowanie rozprawy doktorskiej rozwiewa wszelkie wątpliwości odnośnie przyczyn tak niefortunnych sformułowań zarówno co do tezy, jak i celów pracy.

Recenzowana praca doktorska nosi znamiona rozprawy habilitacyjnej. Jest to praca wielowątkowa, w której Doktorantka podjęła się zbadania wpływu ogromnej ilości wielkości na współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie w minikanalach o przekroju prostokątnym, jak i dodatkowe zjawiska z tym związane (np.: struktury przepływu). Z analizy rozprawy wynika, że bez trudu można zaproponować następujące tezy pracy, które z powodzeniem mogłyby stanowić podstawę do realizacji indywidualnych prac doktorskich. Są to:

- *Istnieje takie usytuowanie przestrzenne minikanalu, przy którym współczynnik przejmowania ciepła podczas wrzenia osiąga wartość maksymalną;*

- Istnieją metody bezkontaktowego pomiaru temperatury powierzchni grzejnej minikanalu, których dokładność pomiaru w warunkach wrzenia czynnika nie odbiega od dokładności powszechnie stosowanej metody termoelektrycznej;
- Zmiana topografii powierzchni grzejnej metodami laserowymi powoduje wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia w przepływie;
- Rozwinięcie powierzchni grzejnej minikanalu rurowego poprzez naniesienie warstwy spiekanej nie wpływa na intensywność wymiany ciepła;
- Istnieje uniwersalna, empiryczna zależność bazująca na liczbach  $We$ ,  $Pr$ ,  $Bo$  oraz  $Re$  pozwalająca wyznaczyć wartość liczby Nusselta podczas wrzenia w przepływie w minikanalach w warunkach ...; itd.

Są to jedynie przykłady tez, które można byłoby wyodrębnić z recenzowanej publikacji. Można byłoby podać kilkanaście kolejnych tez, ponieważ Doktoranta badała również: wpływ rodzaju czynnika roboczego, głębokości minikanalu, innych metod modyfikacji struktury powierzchni grzejnej na wartość współczynnika przejmowania ciepła, na struktury powstające podczas wrzenia, oceniała możliwość wykorzystania metody 2D i funkcji Treftza do wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła czy wpływu wybranych warunków cieplnych oraz przepływowych na wartości lokalnego oraz średniego współczynnika przejmowania ciepła, powstałe charakterystyki wrzenia, itp. Zdaniem recenzenta tak rozbudowana praca doktorska to ewenement, ale jednocześnie problem, myślę dla niejednego pracownika nauki, z jednoznacznym określeniem tezy czy wybraniu kilku szczegółowych celów wielowątkowej pracy.

#### 4. Oryginalność pracy

Tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy intensyfikacji wymiany ciepła. Kierunek badań jest zbieżny z pędzącym postępem technologicznym, który wymusza konieczność odprowadzania dużych ilości ciepła z coraz mniejszych powierzchni. Mając powyższe na uwadze Doktorantka opracowała własną, wielowątkową koncepcję badania wymiany ciepła w przepływie w minikanalach o przekroju prostokątnym. O ile kanały o przekroju kołowym występują powszechnie w technice konwencjonalnych rozmiarów, to mini-wymienniki ciepła bazują na równoległym przepływie czynnika roboczego w kanałach o przekroju prostokątnym wykonanych w metalowym bloku różnymi technikami obróbczymi. Wszelkie metody zmierzające do intensyfikacji wymiany ciepła w miniaturowych wymiennikach ciepła są źródłem zainteresowań specjalistów z zakresu termodynamiki ze szczególnym uwzględnieniem wymiany ciepła. Recenzowana praca idealnie wpasowuje się w aktualny nurt badawczy, a kompleksowe podejście stawia ją, w mojej ocenie, bardzo wysoko.

Ze względu na wielowątkowy charakter recenzowanej pracy opisano w niej wiele aspektów, które zasługują na miano oryginalnych. Wśród najważniejszych należy wymienić: przeprowadzenie badań z wykorzystaniem powierzchni wymiany ciepła modyfikowanej za pomocą techniki elektroerozji, teksturowania laserowo-wibracyjnego, spiekania oraz lutowania; przeprowadzenie badań wpływu orientacji przestrzennej minikanalu (w zakresie kąta obrotu  $0-360^{\circ}$ ) na współczynnik przejmowania ciepła; przeprowadzenie badań z wykorzystaniem nowych niskociśnieniowych czynników chłodniczych; praktycznie bardzo rzadko spotykane w badaniach wrzenia w przepływie wykorzystanie ciekłych kryształów oraz termografii sprzężonych z kamerami szybkiego obrazowania pola temperatury czy struktury przepływu dwufazowego. Wszystkie te zabiegi dają informację o możliwych sposobach intensyfikacji wymiany ciepła, ale także wskazują kierunki, które można uznać za mało przydatne w technice cieplnej.

Dużym osiągnięciem Doktorantki jest zaproponowanie innowacyjnej empirycznej zależności pozwalającej na wyznaczenie bezwymiarowego współczynnika przejmowania ciepła

(liczby Nusselta) do obliczania intensywności wymiany ciepła podczas wrzenia przechłodzonego w minikanalach. Korelacja wykorzystuje: liczbę wrzenia  $Bo$  uwzględniającą turbulizację przepływu przez pęcherzyki parowe, liczbę Webera  $We$  wykorzystywaną w analizie dwufazowego przepływu płynu o silnie zakrzywionych interfejsach, liczbę Prandtla  $Pr$  opisującą podobieństwo właściwości fizycznych płynów oraz liczbę Reynoldsa  $Re$  opisującej podobieństwo przepływu płynu. Liczby te były wykorzystywane w korelacjach innych autorów, ale prawie nigdy jednocześnie. Zaproponowana korelacja jest nowością, która ujmuje wpływ: rodzaju czynnika, orientacji przestrzennej kanału, rodzaju struktury powierzchni grzejnej oraz parametrów cieplno-przepływowych na intensywność wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w minikanale.

## 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. Określono wpływ rodzaju cieczy roboczej na intensywność współczynnika przejmowania ciepła podczas wrzenia przechłodzonego oraz rozwiniętego w minikanale. Dla każdego rodzaju czynnika realizowano badania wrzenia w minikanalach o kilku różnych rodzajach topografii powierzchni wymiany ciepła. W efekcie określono, że największy (nawet dziesięciokrotny) wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła uzyskuje się dla powierzchni zmodyfikowanej techniką laserowo-wibracyjną. Około trzykrotny wzrost współczynnika przejmowania ciepła występuje w przypadku modyfikacji powierzchni grzejnej techniką elektroerozji. Na podstawie badań eksperymentalnych stwierdzono, że wartość optymalna, czyli pozwalająca uzyskać najwyższe wartości współczynnika przejmowania ciepła, kąta pochylenia kanału, zależy od rodzaju czynnika oraz rodzaju struktury powierzchni grzejnej. Wartości te zostały zaprezentowane w pracy. Określono wpływ gęstości strumienia ciepła na wartość lokalnego oraz średniego współczynnika przejmowania ciepła. Zidentyfikowano struktury przepływu zależne od natężenia przepływu czynnika, rodzaju topografii powierzchni, wymiarów minikanalu oraz gęstości strumienia ciepła. Wykreślono charakterystyki lokalnego współczynnika przejmowania ciepła oraz krzywe wrzenia dla badanych przypadków. Uzyskano ogromną bazę wyników badań eksperymentalnych, które porównano ze sobą, dokonano ich analizy, a następnie wyciągnięto wnioski. Zebrane wyniki badań stanowią bazę porównawczą dla wyników badań innych autorów oraz kolejnych, planowanych do zrealizowania przez Doktorantkę. W efekcie badań własnych Doktorantka uzyskała wskazówki do dalszych badań, z których słusznie, za najważniejsze uważa:

- przeprowadzenie badania wpływu innych rodzajów rozwinięcia powierzchni grzejnej (np.: z naniesioną warstwą grafenu) na intensywność wymiany ciepła;
- wykonanie badań wymiany ciepła z zastosowaniem najnowszych, proekologicznych czynników chłodniczych;
- modyfikację równania kryterialnego do opisu wymiany ciepła przy wrzeniu w przepływie w celu uwzględnienia wrzenia nasyconego.

## 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. Rozpoznane metody intensyfikacji wymiany ciepła przez wykorzystanie właściwie zmodyfikowanej struktury powierzchni wymiany ciepła, orientację przestrzenną kanału, czy wykorzystanie odpowiedniego rodzaju czynnika chłodniczego może być wykorzystane przez producentów wymienników ciepła. Uzyskany wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła pozwala projektować urządzenia wymiany ciepła o mniejszych gabarytach, przez co zmniejsza się również ilość cieczy roboczej, ilość energii niezbędnej do napędu urządzeń wymuszających przepływ, itp.

Kolejnym istotnym wnioskiem poznawczym recenzowanej pracy, jest fakt, iż wykorzystując oświetlenie sekcji pomiarowej za pomocą diod luminescencyjnych eliminuje się dotychczasowe wady oświetlenia. Oświetlenie nowego typu nie zaburza pola temperatury oraz eliminuje niewłaściwe odzwierciedlenie barwy sprawiając, że dokładność metod optycznych pomiaru temperatury dorównuje obecnie dokładności metod kontaktowych, a czasami nawet ma nad nimi przewagę (brak mostków cieplnych).

Na uwagę zasługuje zaproponowana i nazywana przez Doktorantkę metoda 2D wyznaczania pola temperatury na powierzchni grzejnika. Umożliwia ona precyzyjne wyznaczenie lokalnej temperatury na powierzchni styku ciecz-ścianka. Znajomość tej temperatury pozwala na wyznaczenie wartości współczynnika przejmowania ciepła na powierzchni wymiany ciepła co jest konieczne do prawidłowego określenia wielkości wymiennika. Prezentowana rozprawa wnosi istotny wkład do działań podejmowanych w renomowanych jednostkach naukowo-badawczych zmierzającego do podnoszenia sprawności i wydajności wymienników ciepła.

## 7. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### Uwagi o charakterze merytorycznym

Treść przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest zgodna z jej tytułem. Podjęty temat jest ważny zarówno ze względów poznawczych, jak i praktycznych, lecz w moim odczuciu jest zbyt szeroki, jak na wymogi stawiane pracom doktorskim. Skutkowało to problemem z prawidłowym sformułowaniem tezy pracy, celu pracy oraz jej zakresu.

Pod względem merytorycznym rozprawa jest poprawna, gdyż skutecznie podejmuje próby eksperymentalnego badania i poszerzenia wiedzy nt. wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie w minikanalach. Trafnie dobrano specjalistyczne źródła literaturowe. Podział treści między poszczególnymi rozdziałami jest logiczny, chociaż w mojej opinii, zabrakło rozdziału, w którym znajdowałby się wyraźny planu eksperymentu. W efekcie łatwo można byłoby się zorientować, wpływ jakiej wielkości na jaką jest analizowany. Sugerować mogłyby to tytuły rozdziałów i podrozdziałów, ale dla przykładu w rozdziale 7.2.2 analizowano (jak wynika z nagłówek) wpływ położenia kanału na, między innymi, współczynnik przejmowania ciepła. W pierwszym akapicie na str. 99 można znaleźć informacje o tym, że: wyniki przedstawiono dla dwóch wybranych gęstości strumienia ciepła; trzech czynników chłodniczych; wykorzystano funkcję Trefftza; wyniki przedstawiono w formie struktur przepływu i zaobserwowano następujące struktury ..., gdy dla innego rodzaju czynnika roboczego struktury przepływu były inne. Jak można się szybko zorientować, w paragrafie tym, nawet nie wspomniano jak kąt pochylenia kanału wpływa na wartość współczynnika przejmowania cie-

pła. Jest to kolejna konsekwencja tak wielowątkowego zakresu badawczego i często samej Doktorantce „umykał sprzed oczu” główny wątek rozdziału. Sytuacja taka powtarza się kilkakrotnie więc zrozumienie niektórych rozdziałów wymagało powtórnego ich przeczytania, mimo iż recenzent uważa się za doświadczonego w tej materii eksperymentatora.

W rozdziale 7.4 Doktorantka przedstawia propozycję własnego równania kryterialnego do obliczania średniej liczby Nusselta podczas wrzenia w przepływie w minikanalach. Następnie dokonuje, jak wynika z nagłówka podrozdziału, porównania z wynikami innych badaczy. W tej części czytelnik oczekuje, iż wyniki badań eksperymentalnych innych autorów zostaną wykorzystane, aby dokonać walidacji zaproponowanej przez Doktorantkę korelacji. Tymczasem Doktorantka własne dane eksperymentalne wstawia do wzorów zaproponowanych przez innych autorów dokonując walidacji tychże wzorów. W efekcie brak jest walidacji własnej korelacji za pomocą wyników badań eksperymentalnych innych autorów.

### Uwagi edytorskie ogólne

Często Doktorantka dokonuje opisu zbyt szczegółowo. Dla przykładu: str. 60 – odnośnie oświetlenia „... dwie świetlówki oraz dwie żarówki LED...”, czy „w laboratorium nie było wentylacji”. Strona 50, jako jeden z elementów stanowiska badawczego wymieniono spawarkę inwertorową. O ile może być ona wyposażeniem stanowiska, to z pewnością jej zadaniem nie było wykonywanie połączeń nierozłącznych. Prawdopodobnie pełniła ona rolę transformatora o dużej wartości natężenia prądu w obiegu wtórnym niezbędnego do wywołania wrzenia czynnika roboczego i tak powinna być opisana. Daleko idąca otwartość w opisie stanowisk badawczych nie musi być dobrze odbierana, a czasami powinna pozostać do wyłącznej wiedzy eksperymentatora.

Zwraca uwagę wysoka jakość rysunków oraz styl pisanie wzorów. Jednak pomimo sprawdzenia tekstu autorka nie ustrzegła się błędów. Są to literówki oraz inne drobne niedociągnięcia. Niektóre ze zdań wymagają poprawy stylu, przy czym wyróżnić można tu zdania, których niepoprawny styl wymaga jedynie drobnej korekty oraz zdania, w których trudno znaleźć sens. Problematiczne stało się więc zaproponowanie prawidłowej formy takiego zdania.

Uwagi edytorskie odnośnie całego tekstu są następujące:

1. Nagminnie powtarzające się sformułowanie „...od wlotu do wylotu...”, np.:
  - str. 35, jest „Inicjacja rozpoczyna się w dalszej odległości od wlotu do wylotu kanału”. Czy chodzi zatem o odległość od wlotu kanału czy odległość do wylotu kanału?
  - str. 74 – podpisy pod rysunkami „Współczynnik przejmowania ciepła w funkcji odległości od wlotu do wylotu minikanalu...”. Czy nie lepiej brzmi „Współczynnik przejmowania ciepła wzdłuż minikanalu...”?
2. Od 70 strony rozprawy pojawiają się w niej informacje w stylu: „seria 4”, „seria 26”. Zmusza to czytelnika do poszukiwań w tekście, lub załącznikach, znaczenia tych terminów. Wybija to czytającego z rytmu, przerywa tok myślenia i utrudnia analizę wyników, a przecież normalną praktyką jest podawanie wprost parametrów cieplno-przepływowych, przy których zrealizowano daną serię pomiarową.
3. Nie powinno się używać sformułowania „poniższe/powyższe równanie/wykres”, gdyż jak widać np. na str. 16 w „poniższe równanie” de facto znajduje się na innej stronie. Powołanie się na numer rysunku/wzoru/tabeli jest właściwą formą odniesienia.
4. Równanie należy traktować jak słowo w zdaniu, a to pociąga za sobą właściwą interpunkcję, tzn. trzeba postawić po nim kropkę, gdy jest to koniec zdania lub przecinek, gdy zdanie jest kontynuowane (np.: przecinek po wzorze 2.1, 2.2, itd.).
5. Nagminnie używane są słowa nie wnoszące nic do treści zdania, a nawet zmieniają jego sens, np.: (str. 34 i słowo *badan*) „Wartości krytycznego strumienia ciepła (CHF) zwiększyły się dla badan z zastosowaniem nieporowatych warstw grafenu (o 9%) i nieporowatych warstw węgla krzemu (o 15,7%) w porównaniu do badan z gładką powierzchnią”.

Lepiej brzmi zdanie „Wartości krytycznego strumienia ciepła (CHF) zwiększyły się dla powierzchni z nieporowatą warstwą grafenu (o 9%) i nieporowatą warstwą węgla krzemowego (o 15,7%) w porównaniu do gładkiej powierzchni”. Z pewnością w trakcie eksploatacji, nie tylko badań, analogiczny wzrost wartości CHF będzie obserwowany.

6. W przepływach dwufazowych ilość przepływającego czynnika roboczego wyrażamy jako gęstość strumienia masy. Podawanie objętościowego natężenia przepływu (np.: str. 81), mimo że w pierwszej fazie badań występuje przepływ I-fazowy nie jest powszechnie praktykowane.

### Wybrane uwagi edytorskie szczegółowe

*Błędy stylistyczne co do treści (np.: utrudniające jej zrozumienie)*

Str. 12 w<sup>5</sup> jest: „...ilość produkowanego ciepła”; lepiej „...ilość wymienianego ciepła”

Str. 13 w<sup>11</sup> jest: „...a temperatura powinna być wyższa od warstwy przyściennej.”; powinno być „...a temperatura powinna być wyższa od temperatury warstwy przyściennej.”

Str. 14 w<sup>18</sup> jest: „...stopień suchości wzrasta do całkowitego odparowania cieczy.”; powinno być, że „...wzrasta do jedności, co odpowiada całkowitemu odparowaniu cieczy.”

Str. 16 w<sup>13</sup> jest: „W kanałach o mniejszych średnicach duży wpływ na proces wrzenia w przepływie mają: zjawiska przemiany fazowej: ...” – jak to rozumieć?

Str. 18 w<sub>3</sub> jest: „... w badaniach uzmienniano..”, powinno być „... zmieniano...”

Str. 19 w<sup>18</sup> „... organicznych mikrowymienników ...” – co to za wymiennik?

Str. 31 w<sup>12</sup> „Powierzchnie teksturowane ... zamieszczono w załączniku”. W załącznikach umieszczono jedynie informacje o tych powierzchniach.

Str. 34 w<sup>21</sup> „...kilka rodzajów gładkich ... powierzchni ...”

Str. 35 w<sup>1</sup> „...powierzchnie...wykazują wyższe wartości współczynnika...”

Str. 190 w<sup>1</sup> „... dzielimy ...” – należy używać formy bezosobowej

Str. 191 w<sup>18</sup> „... dość dokładna, ...” – tzn. jaka?

Str. 195 w<sup>2</sup> „...jest bardzo zadawalająca ...” – tzn. jaka?

*Błędy stylistyczne rażące (uniemożliwiające zrozumienie tekstu)*

Str. 28 w<sup>6</sup> „Przepływ płynu w kanałach o małej średnicy ma charakter lokalny, ...”. Co z ciągłością strugi??

Str. 35 w<sup>16</sup> „Wpływ na CHF ma również działanie siły ciężkości działającej prostopadle do powierzchni ogrzewanej ścianki, przeciwdziałanie oddziaływania równoległego grawitacji na powierzchni ogrzewanej ścianki oraz zapewnienie lepszego kontaktu cieczy ze ścianką.”

Str. 37 w<sup>6</sup> „Po osiągnięciu maksymalnej wartości wzrost spadku ciśnienia był niezmienny lub wykazywał nieznaczną tendencję wzrostową.”

*Literówki i błędy stylistyczne co do użytej formy*

Str. 9 w<sup>4</sup>  $\nu$  - współczynnik lepkości kinematycznej przyjęto oznaczać greckim symbolem (ni) nie zaś „ $\nu$ ” pisane kursywą (wielkość powinno podać się w symbolach greckich)

Str. 22 w<sup>13</sup> „... pochodna temperatury w kierunku do powierzchni...”, powinno być „... w kierunku prostopadłym do powierzchni...”

Str. 22 w<sup>18</sup> ANSYS CFX zamiast „...ANSYS CLX ...”

Str. 55 w<sub>4</sub> „...kąta..” zamiast „...kata...”

Str. 85 w<sub>8</sub> „...seria eksperymentalna 15” zamiast „...serii eksperymentalna 15”



Lista innych zauważonych drobnych uwag dotyczących stylistyki, korekty i redakcji przekazana zostanie Doktorantce.

## 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 w wystarczającym stopniu poprawnie, gdyż występują w niej elementy, które w metodologii nauk ścisłych określają 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. Kingi Strąk: potwierdza jej bardzo wysoki poziom wiedzy teoretycznej w obszarze wymiany ciepła ze szczególnym uwzględnieniem wrzenia w przepływie, stanowi oryginalne osiągnięcie poprzez rozwiązanie wielu zagadnień naukowych oraz wykazuje umiejętność Doktorantki samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. Podane w recenzji uwagi krytyczne mają charakter informacyjny i powinny być inspiracją dla Doktorantki co do sposobu prezentacji wyników badań eksperymentalnych oraz ich publikacji. Uwagi te nie pomniejszają wartości naukowej opiniowanej pracy, którą pod kątem merytorycznym oceniam bardzo wysoko. Wyniki badań zyskały również uznanie recenzentów międzynarodowych, o czym mogą świadczyć liczne artykuły Doktorantki opublikowane w czasopiśmie o najwyższej radzie naukowej.

## 9. Wniosek do Rady Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

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 wrzenia w przepływie w minikanalach. Wniosuję o przyjęcie pracy mgr inż. Kingi Strąk 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 Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo szeroki zakres rozprawy, istotny wkład Doktorantki w postępowanie wiedzy na temat wrzenia czynników chłodniczych w minikanalach oraz międzynarodowe uzyskanych wyników badań wniosuję o jej wyróżnienie.

