

Prof. dr hab. inż. Magdalena Piasecka
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach
tel.: (41) 3424320
email: tmpmj@tu.kielce.pl

12.01.2021
006/WIM.0/2021

Kielce, 5.01.2021

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgra inż. Pawła Dąbrowskiego

pt. *Badania nierównomierności rozprywu płynu w mini i mikro wymiennikach ciepła*

Promotor: prof. dr hab. inż. Dariusz Mikieliewicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Klugmann

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej, dr hab. inż. Pawła Śliwińskiego, prof. PG, nr L.dz.202/2020/WM, z dnia 24.11.2020 r., wystosowanego zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna.

1. Charakterystyka ogólna

Praca w wydaniu maszynopisu liczy łącznie 114 stron tekstu (format A4) i obejmuje: strony tytułowe, oświadczenie (1 strona), opis rozprawy doktorskiej w formie streszczenia w języku polskim i angielskim (2 strony), podziękowania (1 strona), wykaz prac naukowych wchodzących w skład cyklu (1 strona), spis treści (2 strony), wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów (2 strony), rozdział pierwszy - Wprowadzenie (3 strony), rozdział drugi - Definicje minikanalu oraz miniszczeliny (9 stron), rozdział trzeci - Nierównomierność rozprywu w mini wymiennikach ciepła (23 strony), rozdział czwarty - Teza, cel i zakres pracy (1 strona), rozdział piąty - Metodologia badań (10 stron), rozdział szósty - Wyniki badań (17 stron), rozdział siódmy - Podsumowanie, wnioski i kierunki dalszych prac (17 stron), wykaz literatury (11 stron), wykaz rysunków (3 strony), wykaz tabel (1 strona) oraz sześć załączników. Każdy załącznik poprzedzony jest jednostronicowym opisem parametrów bibliometrycznych artykułu, z podaną punktacją MNiSW oraz wskaźnikiem *Impact Factor* w roku publikacji artykułu i roku 2020. W pierwszych czterech załącznikach wyszczególniono zadania zrealizowane przez każdego z autorów artykułu oraz podano wkład procentowy autorów w powstanie każdej z prac. Podkreślę, iż artykuły dołączone w załącznikach od numeru 3 do 6 posiadają wskaźnik *Impact Factor* oraz punktację powyżej 70, wykazywaną w aktualnych rozporządzeniach MNiSW, lista ministerialna A. Każdy z załączonych artykułów jest indeksowany w bazie *Web of Science*.

Główną część rozprawy stanowi zwarte opracowanie w języku polskim, nazwane przewodnikiem, do spójnego tematycznie zbioru sześciu artykułów w języku angielskim, opublikowanych w indeksowanych czasopismach naukowych. Na przewodnik składa się wymienionych wyżej sześć rozdziałów, przy czym zawarto w nim: 35 rysunków, 2 tabele oraz 133 zacytowanych pozycji bibliograficznych o charakterze poznawczym i technicznym, w języku angielskim. Większość pozycji to referaty wydane w punktowanych czasopismach naukowych. Na początku rozprawy umieszczono wykaz prac naukowych wchodzących

w skład cyklu, na jej końcu przedstawiono pełną treść referatów w formie sześciu załączników poprzedzonych opisem. Są to kolejno:

- Załącznik A1 (14 stron): Dąbrowski P., Klugmann M., Mikielawicz D., *Selected studies of flow maldistribution in a minichannel plate heat exchanger*, 2017. **Archives of Thermodynamics**, vol. 38(3), pp. 135-148;
- Załącznik A2 (25 stron): Klugmann M., Dąbrowski P., Mikielawicz D., *Pressure drop related to flow maldistribution in a model minichannel plate heat exchanger*, 2017. **Archives of Thermodynamics**, vol. 39(2), pp. 123-146;
- Załącznik A3 (14 stron): Dąbrowski P., Klugmann M., Mikielawicz D., *Channel Blockage and Flow Maldistribution during Unsteady Flow in a Model Microchannel Plate heat Exchanger*, 2019. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, vol. 12(4), pp. 1023-1035, IF=0,689 (70 pkt - lista MNiSW);
- Załącznik A4 (15 stron): Klugmann M., Dąbrowski P., Mikielawicz D., *Flow distribution and heat transfer in minigap and minichannel heat exchangers during flow boiling*, 2020. **Applied Thermal Engineering**, vol. 181, No. 116034, IF = 4,725 (140 pkt - lista MNiSW);
- Załącznik A5 (13 stron): Dąbrowski P., *Mitigation of Flow Maldistribution in Minichannel and Minigap Heat Exchangers by Introducing Threshold in Manifolds*, 2020. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, vol. 13(3), pp. 815-826, IF = 0,689 (70 pkt - lista MNiSW);
- Załącznik A6 (18 stron): Dąbrowski P., *Thermohydraulic maldistribution reduction in mini heat exchangers*, 2020. **Applied Thermal Engineering**, vol. 173, No. 115271, IF = 4,725 (140 pkt – lista MNiSW).

2. Istotność problematyki rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Dąbrowskiego jest analiza nierównomierności rozpyływu płynu w mini i mikro wymiennikach ciepła. Wybór tematu pracy był podyktowany istotnym zagadnieniem w technice: występowaniem nierównomierności rozpyływu jedno lub dwufazowego płynu w kanałach zamkniętych wymienników ciepła wraz z towarzyszącymi mu niestabilnościami, które trudno jest przewidywać i kontrolować. Pożądane jest ciągle zwiększanie efektywności wymienników ciepła o niewielkich wymiarach, jednak kontrola pracy takich urządzeń jest znacznie utrudniona ze względu na nieprzewidywalność rozpyływu płynu w mini kanałach czy mini szczelinach, co w dużym stopniu może zaburzać ich pracę oraz zmniejszać efektywność pracy urządzeń.

Autor stawia następującą tezę:

Możliwa jest poprawa równomierności rozpyływu płynu, która spowoduje zwiększenie sprawności w mini i mikro wymiennikach ciepła, poprzez odpowiednie zaprojektowanie kolektorów wlotowych oraz wylotowych.

Postawioną tezę Doktorant potwierdza dzięki zrealizowanym badaniom eksperymentalnym i obliczeniom numerycznym, opartym na wynikach przeprowadzonych eksperymentów lub otrzymanym przy wykorzystaniu komercyjnego programu ANSYS Fluent.

Uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Dąbrowskiego odpowiada światowym trendom w dziedzinie analizy i modelowania zagadnień przepływu i wymiany ciepła w mini kanałach i mini szczelinach – przestrzeniach ograniczonych o niewielkich wymiarach przekroju. Mimo, iż liczba prac dotyczących adiabatycznego lub

diabatyicznego przepływu czynników w wymiennikach ciepła z mini i mikro geometrią układu testowego urządzeń zwiększyła się znacznie w ciągu ostatnich dwudziestu lat, to prace oparte na wynikach badań doświadczalnych są stosunkowo nieliczne, ze względu na znaczny stopień trudności ich przeprowadzania. W ciągu ostatnich lat można zaobserwować znaczne zwiększenie zainteresowania naukowców zagadnieniami związanymi z niestabilnościami przepływu w mini kanałach, mini szczelinach, czy też mikro przestrzeniach sekcji testowych wymienników ciepła. Modelowanie zagadnień przepływu płynów z wykorzystaniem metod numerycznych i popularnych programów komercyjnych CFD, takich jak: ANSYS Fluent, ANSYS CFX, COMSOL, ale też ABAQUS, ADINA czy STAR-CMM+, staje się coraz bardziej powszechne, nie tylko w ośrodkach naukowych współpracujących z przemysłem. Należy pamiętać, iż niezwykle istotna jest walidacja wyników otrzymanych z symulacji numerycznych. Wyniki z eksperymentów pozwalają na zweryfikowanie otrzymanych wyników obliczeń, zgodnie z założonymi modelami. Do weryfikacji wyników obliczeń numerycznych można wykorzystywać dane z własnych badań eksperymentalnych lub/i odnieść się do wyników otrzymanych przez innych badaczy. Wyniki, które są związane z przepływem adiabatycznym, są trudniejsze do obserwacji eksperymentalnych, opisu i analiz, zwłaszcza, gdy zagadnieniom towarzyszy zmiana fazy czynnika roboczego i ma miejsce przepływ dwufazowy. Jest to zagadnienie szczególnie istotne w mini i mikro układach wymiany ciepła, w których następuje deformacja struktur przepływu, niestabilności przepływu, ciśnienia i temperatury, powodujące nierównomierny rozptyw płynu, a nawet blokowanie przepływu czy przepływ wsteczny. Mimo faktu, iż w ciągu ostatnich lat można zauważyć zwiększone zainteresowanie naukowców tematem niestabilności występujących podczas przepływu płynów w wymiennikach ciepła o niewielkich wymiarach, brak jest w literaturze rozwiązań, które pozwoliłyby na zapobieganie bądź niwelowanie występowania takich niestabilności.

3. Omówienie zawartości rozprawy doktorskiej

W pierwszym rozdziale przewodnika wprowadzono w tematykę pracy, scharakteryzowano kompaktowe wymienniki ciepła i podano ich klasyfikację, opierając się na źródłach literaturowych, a także omówiono sposoby zwiększania współczynnika przejmowania ciepła podczas przepływu.

W rozdziale drugim Autor skoncentrował się na skrótowym omówieniu stanu wiedzy na temat badań nad przepływem płynu w mini kanałach, koncentrując się na pracach, w których głównym przedmiotem zainteresowania były zjawiska towarzyszące zagadnieniom nierówności rozptywu, ale też metody określania struktur przepływu dwufazowego i tworzenia ich map, fluktuacje i niestabilności ciśnienia, przepływu i temperatury płynu. Rozdział zawiera definicje mini kanałów i mini szczelin, omówione na podstawie szeroko uznawanych przez naukowców źródeł literatury. Oprócz opisów, pokazano tabelaryczne zestawienie kilku kryteriów przejść ze skali makro do mikro kanałów zamkniętych oraz charakterystykę mini geometrii, na podstawie 29 prac wybranych z literatury światowej. Temat ten został przedstawiony, jako dyskusja otwarta. Autor wskazał, iż definicje mini geometrii są niespójne i zasadniczo różnią się w zależności od źródła literatury, zdarzają się duże rozbieżności w stosowanym przez naukowców nazewnictwie, dotyczący użycia terminów *mini kanał* i *mini szczelina*. Podkreślono, iż prace nad wymiennikami ciepła, wykorzystującymi mini geometrie, są aktualnie intensywnie prowadzone w licznych ośrodkach naukowych, a wyniki badań prezentowane są szeroko w literaturze.

W rozdziale trzecim Doktorant wprowadził do zagadnienia nierównomierności rozptywu płynu w mini wymiennikach ciepła, na podstawie dokonanego przeglądu wybranych prac literatury światowej. W pierwszej części rozdziału kolejno omówiono podstawowe parametry wpływające na nierównomierność rozptywu w konstrukcjach wymienników ciepła z mini geometrią, w tym: wpływ spadków ciśnienia i natężenia

przepływu płynu oraz geometrię kanałów zbiorczych wraz z lokalizacją wlotu i wylotu płynu. Dalsza część tego rozdziału obejmuje analizę dwóch kolejnych parametrów powodujących nierównomierności przepływu: kierunek i konfigurację (kierunek przepływu w kolektorach oraz wzajemne położenie wlotu i wylotu czynnika roboczego w konstrukcji wymiennika ciepła) oraz geometrię kanałów, a w szczególności ich przekrój i długość. W tej części pracy omawiane zagadnienia zostały zilustrowane rysunkami Doktoranta, przybliżającymi konstrukcję wymienników ciepła z mini geometrią. Druga część rozdziału zawiera opis metod badań nierównomierności przepływu. Kolejno omawiane są pomiary: prędkości płynu, natężenia przepływu, ciśnienia oraz rozkładu temperatury. W ostatniej części rozdziału Doktorant prezentuje opis metod redukcji nierównomierności przepływu, zgodnie z wybranymi pozycjami literatury. Tę część pracy wieńczy podsumowanie omawianych zagadnień.

Rozdział czwarty zawiera tezę i zakres pracy. Tezę przytoczono w początkowej części niniejszej recenzji. Doktorant szczegółowo wskazuje zakres pracy, jednak nie został określony konkretny cel, który chciałby osiągnąć. Można jednak założyć, iż zakres pracy pośrednio został ujęto w tezie i treści rozdziału. W dalszej części rozdziału wymieniono szczegółowo sześć artykułów współautorstwa lub autorstwa mgra inż. Pawła Dąbrowskiego, które stanowią jednotematyczny cykl publikacji ujętych w recenzowanej dysertacji doktorskiej.

Kolejny rozdział – piąty, poświęcono opisowi metodologii badań, które omówiono wydzielając obszar badań eksperymentalnych i obszar badań numerycznych, w kolejnych podrozdziałach tej części pracy. Podrozdział pierwszy zawiera opisy stanowiska badawczego oraz sekcji testowych z zestawem mini kanałów oraz z pojedynczą mini szczeliną. W tej części pracy ogólne omówiono elementy stanowiska, pokazano schematy realizowanych obiegów oraz rozwiązania konstrukcyjne modułów testowych wraz z ich widokami, przy czym Autor odsyła do szczegółowych opisów, zawartych w załącznikach. W kolejnym rozdziale ogólnie scharakteryzowano przeprowadzone obliczenie numeryczne. Przedstawiono w nim zaproponowany model fizyczny dla sekcji mini kanałowej i sekcji mini szczelinowej (ilustracje pokazują wymiary poszczególnych elementów) oraz podano równania rządzące. Podrozdział zakończono ilustracją wyników otrzymanych współczynników nierównomierności rozprywu w sekcji mini kanałowej otrzymanej na podstawie wyników własnych badań eksperymentalnych, dla każdego z mini kanałów oraz obliczonych z wykorzystaniem symulacji numerycznej CFD. W celu weryfikacji otrzymanych liczb Nusselta, zestawiono je z otrzymanymi na podstawie zależności wybranej z literatury oraz przedstawiono je na wykresach w funkcji długości sekcji mini kanałowej. Rozdział wieńczy podanie pojęcia prędkości bezwymiarowej, wyznaczanej na podstawie lokalnych wartości prędkości przepływu w mini kanale oraz mini szczelinie, odniesionych do prędkości średniej.

W rozdziale szóstym omówiono wyniki badań, przedstawiając wybrane z nich, odsyłając do wyników zaprezentowanych w załączonych do przewodnika referatów. Wyniki te pozwalają zweryfikować Doktorantowi postawioną tezę. W rozdziale tym, analogicznie jak w poprzednim, rozdzielono prezentację wyników otrzymanych eksperymentalnie od tych, które uzyskano na drodze obliczeń numerycznych. W pierwszej części rozdziału przeanalizowano rozkłady bezwymiarowej prędkości przepływu płynów w mini kanałach dla wybranych wartości masowego natężenia przepływu i geometrii mini kanałów. Następnie przeanalizowano zjawisko blokowania mini kanałów, ilustrując je wynikami prezentowanymi na wykresach oraz wizualizacjami przepływów w mini kanałach oraz mini szczelinie, w warunkach diabatywnych dla wody i adiabatycznych dla etanolu. W przypadku badań rozprywu płynu w mini szczelinie, powierzchnia metalowej ściany pozostawała gładka lub rozwinięta, przy czym rozwinięcie wykonano w formie mikro rowków, ustawionych w kierunku poprzecznym lub pod kątem 45 stopni do kierunku wpływu płynu. W badaniach

stosowano również drugi rodzaj rozwinięcia powierzchni, którą stanowiły mini wgłębienia. Wyniki zilustrowano wizualizacją rozprywu płynów roboczych w modułach testowych. Podkreślono, że w mini szczelinach przepływ należy analizować jako dwuwymiarowy, zatem analiza dystrybucji płynu jest znacznie bardziej skomplikowana niż w mini kanałach, gdzie przepływ można traktować jako jednowymiarowy. Analizując wyniki badań numerycznych, Doktorant skoncentrował się na propozycji zmodyfikowania konstrukcji kanałów zbiorczych, która pozwoliłaby na zmniejszenie nierównomierności rozprywu płynu. Modyfikacja geometrii obejmowała wykonanie w sekcji wlotowej dodatkowego elementu - progu, co spowodowało modyfikację głębokości mini kanałów oraz mini szczelin. Przeanalizowano kilka wariantów geometrii progów, w tym: prostokątnego, trapezowego, trójkątnego oraz parabolicznego (zwanego wypukłym), przy zmiennej wysokości progu. W modelowaniu numerycznym zmieniona została (w stosunku do wykorzystywanego w badaniach eksperymentalnych modułu testowego) długość mini geometrii. W rozdziale zaprezentowano wybrane wyniki, w tym: lokalne wartości prędkości bezwymiarowej w funkcji szerokości mini kanałowego i mini szczelinowego wymiennika ciepła, lokalne linie prądu w zmodyfikowanych kolektorach wlotowych, profile temperatury oraz prędkości na powierzchni wymiennika ciepła z mini kanałami oraz z mini szczeliną. Podkreślono, iż wprowadzenie progu w sekcji wlotowej wymiennika ciepła powoduje zmniejszenie wartości współczynnika nierównomierności rozprywu dla obu mini geometrii, zwłaszcza w przypadku mini szczelinowego modułu testowego. Przeanalizowano wyniki otrzymane dla wybranych kilku wysokości progu, wskazując jego wymiary, które pozwalają na uzyskanie najlepszych wyników pod kątem poprawy nierównomierności rozprywu płynu, w konsekwencji pozwalające na zwiększenie sprawności wymiennika ciepła. Podkreślę, iż wyniki otrzymane dla zmodyfikowanych wymienników ciepła z mikrogeometrią mini kanałową czy mini szczelinową, otrzymane dla ulepszonych konstrukcji wlotowych z progiem, dla rozwiniętej powierzchni ścian, powstałe w wyniku badań eksperymentalnych czy numerycznych, porównano z otrzymanymi dla bazowych konstrukcji (bez ulepszeń czy modyfikacji powierzchni).

Pracę zakończono podsumowaniem, zawartym w rozdziale siódmym, zawierającym wnioski wynikające z otrzymanych wyników i analiz dla przedstawionej dysertacji doktorskiej oraz bibliografią, spisem rysunków oraz spisem tabel. W ostatnim rozdziale pracy podano również wytyczne i kierunki dalszych prac Doktoranta. Główną część pracy – przewodnika – uzupełniają załączniki, które stanowią integralną część pracy. Zawarte w nich są szczegółowe dane dotyczące badań eksperymentalnych i analiz numerycznych oraz uzupełniające wyniki badań, w stosunku do zaprezentowanych w przewodniku.

4. Uwagi

Moim zdaniem, referaty podane w załącznikach, w większości opublikowane w czasopiśmie naukowych o wysokich parametrach bibliometrycznych, są dowodem, iż Doktorant wykonał dysertację doktorską na odpowiednim poziomie naukowym, z wykorzystaniem aktualnych metod i technik badawczych, dostępnych w literaturze światowej.

W przedstawionym do oceny przewodniku występują nieliczne błędy edycyjne, w tym tzw. „literówki”, pewne nieścisłości językowe, usterki stylistyczne, nieprawidłowości w stosowaniu znaków interpunkcyjnych oraz błędy odniesień do literatury. Poniżej przedstawiam reprezentatywne przykłady ww. błędów i nieścisłości:

- stosowanie redundantnych połączeń wyrazowych, przykład: „płynem płynącym” (pierwsza linijka str. 42);

- drobne błędy literowe, przykład: „... to zmniejszanie maksymalnej różnicy temperatur...” (20 linijka od dołu str. 43);

- budowanie zdań wielokrotnie złożonych, niejasnych – przykład to pierwszy paragraf punktu 3.2 podany na str. 35;

- nieścisłości w nazwiskach autorów cytowanych w tekście i bibliografii, dotyczą cytowania:

- pozycji oznaczonej jako [71] na stronie 20 (7 linijka od góry strony), której numer nie odpowiada nazwiskom wykazywanym w spisie literatury;
- pozycji oznaczonej jako [117] na stronie 34 (11 linijka od góry strony), której numer nie odpowiada nazwiskom wykazywanym w spisie literatury;
- w spisie literatury dla poz. [114] podano pełne imię i nazwisko autora, które zostało przywołane błędnie w cytowaniu na str. 30 (6 linijka od dołu strony);

- błędy interpunkcyjne, przede wszystkim częste braki przecinków, których efektem jest spowodowanie pewnych nieścisłości treści zdań, gdy stosowane są zdania wielokrotnie złożone;

- ważniejsze uwagi dot. oznaczeń:

- czcionka pochylona, stosowana w przewodniku na oznaczenie zmiennych, nie występuje w wykazie ważniejszych oznaczeń i skrótów (w wykazie stosowana jest czcionka prosta, jak również w większości prezentowanych wykresów); powoduje to niespójność oznaczeń;
- brak liczby Reynoldsa w wykazie oznaczeń i przytoczenia jej definicji, trudno tę liczbę nie nazwać bardzo istotną i ważną dla rozpatrywanych zagadnień;
- wprowadzenie w oznaczeniach jako La liczbę Laplace'a, przy czym tym samym oznaczeniem w tekście nazwano stałą Laplace'a, z podaną we wzorze (2.1) definicją.

Pozostałe uwagi o charakterze merytorycznym do informacji przedstawionych w przewodniku:

- moim zdaniem przy wprowadzeniu w temat rozprawy, jakim jest rozdział 1, nie powinno się podawać wzorów, zwłaszcza tak podstawowych dla zagadnień wymiany ciepła jak prawo Newtona dla strumienia ciepła dla konwekcji – dot. wzoru (1.1), przy czym brak objaśnień elementów we wzorze czyni go niejasnym dla czytelnika (brak definicji różnicy temperatury czy powierzchni);
- niejasne sformułowania dotyczące metody ilościowej analizy nierównomierności rozplywu, wskazane w pierwszym paragrafie podrozdziału 3.2.1;
- stosowanie skrótów i brak wyjaśnień wielkości podawanych we wzorach, czyni je czasami niezrozumiałymi i niejasnymi w interpretacji;
- w rozdziale czwartym nie sformułowano celu/celów pracy; mimo iż podana jest szczegółowo teza oraz zakres pracy, cele również należałoby wymienić;
- w rozdziale piątym pewne dane podano bardzo ogólnie, brak jest przykładowo danych dotyczących materiałów modułów testowych;
- w podrozdziale 5.2 informacje dot. badań numerycznych, a w szczególności procedury obliczeń numerycznych, są bardzo ogólne, brak jest danych dot. siatki obliczeniowej (Doktorant nazywa siatki „rzadkimi” lub „gęstymi” lecz nie podaje kryterium ich podziału lub charakterystyki); nie zdefiniowano szczegółowo warunków brzegowych (w schemacie do modelu przedstawiono jedynie geometrię

sekcji mini kanałowej i mini szczelinowej oraz podstawowe ich wymiary); brak jest informacji nt. zagadnienia związanego ze stratami ciepła do otoczenia;

- Doktorant powinien poświęcić w przewodniku część miejsca na przedstawienie sposobów obliczeń błędów eksperymentalnych i obliczeniowych, bez oszacowania których trudno jest ocenić rzetelność prezentowanych obliczeń;
- stosowanie terminów „moment czasu” – podpis rys. 6.8, str. 63, nie wydaje się być prawidłowym w języku polskim, proponuję stosować określenie „chwila czasowa”;
- w badaniach numerycznych stosowano geometrię modułów testowych z mini szczeliną lub mini kanałami o głębokości 8 mm; analizując klasyfikacje dotyczące podziałów kanałów, trudno jest zakładać, że mini kanały o takiej głębokości spełniać będą kryteria zaprezentowane przez Autora pracy we wcześniejszym z rozdziałów.

Przedstawione uwagi nie wpływają na całościową pozytywną ocenę pracy.

Nie będę przedstawiać uwag do prac już opublikowanych, które zostały poddane już procesowi recenzji. Wiele kwestii zapewne zostało wyjaśnionych, a najważniejsze – prace te zostały opublikowane w uznawanych czasopismach naukowych, ważnych dla dyscypliny naukowej. Proszę jednakże, aby Doktorant odniósł się do następujących kwestii:

- 1) Jakie wartości parametrów chropowatości (R_a , S_a) posiadała powierzchnia metalowa (gładka bądź rozwinięta) mini kanałów/mini szczelin w przeprowadzonych badaniach? W jaki sposób, zdaniem Doktoranta, rozwinięcie powierzchni w mini skali (rzędu kilku μm) może wpłynąć na dystrybucję prędkości czy rozkład temperatury w stosowanych wymiennikach ciepła ze stosowaną mikrogeometrią? Czym kierowano się wybierając rozwinięcia powierzchni i w którym kierunku związane z rozwinięciami powierzchni ma zamiar podążać Doktorant, aby być bliskim pozytywnemu zweryfikowaniu sformułowanej tezy rozprawy doktorskiej?
- 2) W przewodniku brak jest przeprowadzenia analizy błędów, a w przedstawionych referatach załączonych do przewodnika, można odnaleźć jedynie pewne elementy czy uzyskane wartości błędów czy niepewności pomiarowych parametrów eksperymentalnych czy wartości obliczanych (np. w załączniku 3 punkt 4 podano ogólną metodą stosowaną w analizie błędów, a w dołączonej tabeli podano niepewności pomiarowe wybranych parametrów eksperymentalnych, w załączniku 4 w tabeli 1). Z powodu stosowanych różnych geometrii modułów testowych oraz procedur eksperymentalnych oraz obliczeniowych, proszę o przedstawienie najważniejszych niepewności pomiarowych podstawowych wielkości wyznaczanych i obliczeniowych w reprezentatywnych badaniach;
- 3) Proszę o scharakteryzowanie metodologii wykonywania obliczeń numerycznych, z objaśnieniem przyjęcia warunków brzegowych.

5. Ogólna ocena pracy

Przedstawiona do oceny praca w formie przewodnika, a przede wszystkim referaty w języku angielskim, opublikowane w uznanych czasopismach naukowych wskazują, że Doktorant posiada wiedzę i potrafi ją przedstawić w kręgach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Jest to niezwykle istotne dla ośrodków szkolnictwa wyższego i spełnia aktualne wymagania i oczekiwania przeprowadzonej reformy szkolnictwa wyższego. Praca jest ciekawa i nowatorska, wpisuje się w aktualne trendy stawiane młodym naukowcom. Oceniam, najważniejszym innowacyjnym elementem pracy jest propozycja nowych

rozwiązań konstrukcyjnych mini geometrii wymienników ciepła, a zwłaszcza dodanie elementów progowych. Jednocześnie chcę podkreślić, że przeprowadzenie własnych badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych, wymagało dużego zaangażowania i umiejętności Doktoranta w obu ważnych obszarach badań: eksperymentalnego i związanego z obliczeniami numerycznymi.

Na podstawie przedstawionych w załącznikach referatach współautorstwa czy autorstwa mgra Dąbrowskiego, można zauważyć dynamiczny rozwój naukowy Doktoranta. Bez wątpienia praca doktorska została wykonana samodzielnie, w zespole prof. Dariusza Mikieliewicza, który od wielu lat zajmuje się zagadnieniami mini i mikro wymienników ciepła. Dwa z referatów powstały jako samodzielne publikacje Doktoranta. Podkreślę, że dwie z publikacji zostały wydane w czasopiśmie naukowym o wysokich parametrach bibliometrycznych. Oceniam, iż przedstawiona praca wnosi wartościowy wkład do badań i analiz w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, dla zagadnień mechaniki płynów, termodynamiki i wymiany ciepła, a szczególności do analizy zjawisk przepływu adiabatycznego i adiabatycznego płynów roboczych w wymiennikach ciepła z mini geometrią.

6. Podsumowanie i wnioski

Reasumując, uważam, że praca doktorska mgra inż. **Pawła Dąbrowskiego** pt. *Badania nierównomierności rozplywu płynu w mini i mikro wymiennikach ciepła* spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim, o których mowa w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 4.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami – Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3.07.2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669), to jest, że stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje ogólną wiedzę Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego badań naukowych. **W związku z powyższym: stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana mgra inż. Pawła Dąbrowskiego do jej publicznej obrony.** Jednocześnie, biorąc pod uwagę szeroki zakres rozprawy, w ramach której przeprowadzono badania eksperymentalne oraz symulacje numeryczne, a przede wszystkim wliczone w skład rozprawy artykuły opublikowane w wysoko punktowanych czasopismach naukowych, potwierdzające istotny wkład Doktoranta w postęp wiedzy na temat nierównomierności rozplywu w wymiennikach ciepła z mini geometrią, **wnioskuję o wyróżnienie doktoratu.**

Heidele Praczy