



dr hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. PB

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

Białystok, 28.05.2021

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Cezarego Czajkowskiego *Wpływ zmian sił masowych na zjawiska cieplno-przepływowe zachodzące w pulsacyjnej rurce ciepła*

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej *Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*, Pana dr. hab. inż. Roberta Króla, prof. uczelni, zgodnie z pismem RDND08/40/2021

Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Sławomir Pietrowicz, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Przemysław Błasiak.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w formacie A4, a całość obejmuje 125 stron. Dysertacja składa się z następujących części: **nienumerowanych** – Streszczenie-w języku polskim i w języku angielskim (Summary); Podziękowania; Wykaz oznaczeń; Spis treści; Spis tablic; Spis rysunków (w początkowej części pracy) oraz Bibliografii (w końcowej części pracy), a także **numerowanych**- Wprowadzenie (rozdział 1, str.1-30); Cel, teza i zakres pracy (rozdział 2, str.31-32); Model numeryczny (rozdział 3, str.33-71); Stanowisko badawcze (rozdział 4, str.71-87); Wyniki badań doświadczalnych (rozdział 5, str.88-110); Podsumowanie i wnioski (rozdział 6, str.111-114). Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

Wprowadzenie zawierające opis historii rozwoju koncepcji pasywnego transportu ciepła przy udziale od termosyfonu, poprzez klasyczne rurki ciepła, aż do pulsacyjnej rurki ciepła.

Rozdział 1 zawiera opis zjawisk fizycznych zachodzących podczas procesu wymiany ciepła przy udziale PHP.

Cel, teza i zakres pracy to rozdział 2 zawierający treściwe określenie problemu badawczego oraz metodyki jego rozwiązania.

Rozdział 3 to analityczno-numeryczna część pracy, gdzie opisano model matematyczny. Doktorant przedstawił analizę jednowymiarową uproszczonego modelu PHP ograniczonego do jednego zagięcia rurki, tzw. „u-kształtu”. Zwięźle przedstawił trzon modelu oparty na zasadzie zachowania pędu oraz opisał procedurę numeryczną. W końcowej części rozdziału przeprowadził walidację otrzymanych wyników z danymi literaturowymi.

Rozdział 4 zawiera opis zbudowanego stanowiska badawczego, które opracowane zostało w celu walidacji modelu matematycznego, przedstawionego w rozdziale 3. Ta część

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

113/450/2021

Wpłynęło dnia 31.05.2021r.

rozprawy zawiera opis wykonanych prac eksperymentalnych wraz ze zwięzłą prezentacją zastosowanych technik pomiarowych.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie otrzymanych wyników eksperymentalnych. Doktorant przedstawia wyniki dla dwóch osobnych grup pomiarowych, różniących się zastosowanym czynnikiem roboczym. Na zakończenie zostaje przedstawiona walidacja modelu matematycznego względem eksperymentu, co jest tematem postawionej tezy głównej dysertacji.

We **wnioskach**, Doktorant podsumowuje całość prac badawczych oraz przedstawia 12 zwięzłych konkluzji.

Zestawienie literaturowe zawiera spis wykorzystanych źródeł i obejmuje 85 pozycji. Składają się na nie książki, monografie, materiały konferencyjne, jak również publikacje i patenty. W większości Doktorant korzystał z nowych i aktualnych zasobów literaturowych.

II. Teza, cel i zakres rozprawy

Teza, cel i zakres rozprawy stanowią treść rozdziału 2 dysertacji.

Teza rozprawy brzmi następująco: *w układzie obrotowym możliwe jest zastosowanie pulsacyjnych rurek ciepła na potrzeby chłodzenia.*

Teza pomocnicza rozprawy brzmi następująco: *generowana siła bezwładności, skierowana wzdłuż normalnej do osi obrotu, zmienia warunki transportu ciepła zachodzącego wewnątrz przestrzeni kapilarnych dzięki czemu istnieje optymalna wartość prędkości obrotowej układu, dla której wartość oporu cieplnego pulsacyjnej rurki ciepła osiąga minimum.*

Celem rozprawy jest opracowanie modelu matematycznego pulsacyjnej rurki ciepła umieszczonej w układzie nieinercyjnym oraz jego walidacja na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym. W pracy scharakteryzowano cele pomocnicze jako narzędzie do uzyskania celu głównego. Stanowią one **zakres pracy** i obejmują:

- Sformułowanie równań matematycznych opisujących procesy cieplno-przepływowe zachodzące w pulsacyjnej rurce ciepła oraz ich analiza za pomocą obliczeń numerycznych.
- Analiza zjawisk cieplno-przepływowych dla wybranych warunków początkowych i brzegowych.
- Zaprojektowanie stanowiska badawczego.
- Wykonanie stanowiska. Przeprowadzenie pomiarów cieplnych.
- Porównanie wyników doświadczalnych z numerycznymi.

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac badawczych zaproponowany przez Doktoranta ze sformulowanym celem w pełni koresponduje.

III. Treść rozprawy

Treść pierwszego rozdziału uzupełnia opisowe potrzeby rozprawy, wprowadzając odbiorcę w temat transportu ciepła przy udziale zjawisk odparowania oraz skraplania. Doktorant prowadzi czytelnika poprzez rys historyczny od czasu powstania pierwszej instalacji jednofazowej (centralne ogrzewanie), aż po pierwszą instalację posiadającą wbudowaną rurkę ciepła (korzystającą ze zmiany stanu skupienia czynnika roboczego). W

kolejnej części wstępu Autor dokładnie opisuje sposób działania oraz budowę pulsacyjnej rurki ciepła, wskazując, że jej wynalazcą jest Hisateru Akachi. Końcowa część wstępu opisuje wyzwania obecnych rozwiązań, opartych na pulsacyjnej rurce ciepła. Na podstawie przeglądu literatury Doktorant określa zmienne mające znaczący wpływ na wydajność cieplną procesu prowadzonego przy udziale PHP.

Rozdział drugi to zwięzły opis celu, zakresu oraz tezy pracy doktorskiej. Autor zwraca uwagę na fakt znaczącego wpływu rodzaju czynnika roboczego, wielkości dostarczanego strumienia ciepła, parametrów geometrycznych wymiennika oraz zmiany wielkości oddziałującej siły masowej, na warunki realizowanego, w przestrzeniach kapilarnych, procesu cieplno-przepływowego.

W rozdziale trzecim przeprowadzone zostały rozważania analityczno-numeryczne. W pierwszej części Doktorant zauważa, że dostępne w literaturze modele numeryczne nie uwzględniają ruchu obrotowego pulsacyjnej rurki ciepła, tym samym wykluczając z równań wpływ oddziaływania powstającej siły bezwładności. Autor opiera ten rozdział na modelu źródłowym opracowanym przez Zhang i in. (Y.Zhang, A.Faghri i M.B Shafii, „Analysis of liquid-vapor pulsating flow in a U-shaped miniature tube.”, *IJHMT*, 45(12), 2002). Doktorant przedstawia szczegółowy opis przyjętego modelu fizycznego, który ograniczył do jednego zagięcia rurki, nazywając je w dalszej części pracy „u-kształtem”. Zostaje rozpisany układ sił dla zagięcia umieszczonego na obrotowym dysku, czego wynikiem jest równanie rządzące wynikające z zasady zachowania pędu. W kolejnej części opisowi podlega procedura numeryczna, która zakończona jest przedstawieniem wyników zbieżności obliczeń opartych na zmodyfikowanym modelu matematycznym Doktoranta, z obliczeniami wykonanymi na modelu źródłowym. W kolejnym kroku przedstawiona została analiza procesu wymiany ciepła przy pomocy liczb bezwymiarowych. W podsumowaniu Doktorant stwierdza, że parametr bezwymiarowej prędkości obrotowej wpływa na częstotliwość i amplitudę funkcji tak przemieszczenia, jak i masy, ciśnienia czy temperatury korka pary w czasie. Analiza na podstawie zmiennych wymiarowych to następny podrozdział. Przeprowadzono w nim obliczenia opierające się na takich parametrach jak: prędkość kątowna, średnia wartość mocy cieplnej sekcji skraplania oraz opór cieplny urządzenia. Autor analizuje wpływ zmiany średnicy kanału przepływowego oraz gęstości, wartości ciepła parowania i lepkości czynnika roboczego na temperaturę korka pary oraz moc sekcji skraplania. Określa, że wraz ze wzrostem amplitudy temperatury w funkcji czasu, ilość transportowanej energii cieplnej jest większa. Na zakończenie przeprowadzonych rozważań teoretycznych Doktorant przedstawia symulację obliczeń względem wybranej publikacji zawierającej wyniki eksperymentalne (N.Kammuang-lue, K.On-ai, P.Sakulchangsattajatai i P.Tendertoon, „Thermal characteristics of a rotating closed-loop pulsating heat pipe affected by centrifugal accelerations and numbers of turns.”, *JME*, 4(3), 2017). Opisane zostają słabości modelu matematycznego, który nie zapewnia odpowiednio dużej zbieżności z wybranym eksperymentem, jednak umożliwia wykazanie tendencji przebiegu procesu.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawia opis stanowiska badawczego. Zostają określone wyzwania jakie stały na drodze w czasie projektowania oraz budowy jednostki. Konstrukcja badawcza została przystosowana do kształtu maszyny powszechnie stosowanej w przemyśle farbiarskim. W niniejszym rozdziale szczegółowemu opisowi podlega budowa wymiennika ciepła nazwanego jako FSOHP (Flower Shape Oscillating Heat Pipe), który został objęty ochroną patentową na skale krajową. Doktorant opisuje wybór czynnika roboczego, który opiera na wodzie oraz HFE-7000. W kolejnym kroku uwaga zostaje skupiona na aparaturze badawczej oraz metodzie akwizycji danych. Cały system zapewnia

pomiar temperatury w ponad 80 punktach krytycznych instalacji. W dodatku zainstalowany zostaje przetwornik ciśnienia oraz sterowanie prędkości obrotowej głównego wału napędowego. Procedura pomiarowa zawiera szczegółowy opis czynności prowadzonych podczas kolejnych serii kampanii pomiarowej. Autor skupia się na dużym znaczeniu sprawdzenia szczelności układu kapilar oraz utrzymaniu tej szczelności podczas kolejnych badań. Stwierdza, że jest to kluczowa sprawa względem tzw. gazów niekondensujących oraz wydajności cieplnej wymiennika, której sposób obliczania przedstawia na zakończenie rozdziału wraz z analizą dokładności oraz niepewności pomiarowej.

Rozdział piąty stanowi opis uzyskanych wyników badań doświadczalnych. Doktorant opisuje 26 serii pomiarowych osobno dla dwóch płynów. W pierwszej kolejności skupia się na wodzie jako czynniku roboczym. Przedstawiona zostaje analiza wpływu kierunku obrotu maszyny na kierunek przepływu czynnika wewnątrz kapilar. Opisany zostaje wpływ zmiany wypełnienia wymiennika (parametr FR, %), zmiany mocy grzewczej sekcji parowania (parametr Q, W) oraz prędkości obrotowej (parametr n, obr/min) na wydajność cieplną wymiennika. Analiza zwieńczona jest wykresem 3D przedstawiającym mapę konturów jako zależność oporu cieplnego urządzenia od stopnia wypełnienia wymiennika czynnikiem roboczym oraz prędkości obrotowej wału. Dla wody uzyskano minimum funkcji w okolicy od $n=50$ obr/min do 150 obr/min i $FR < 70\%$. Następnie Autor przechodzi do kolejnego podrozdziału, gdzie rozpoczyna omówienie wyników badań eksperymentalnych dla drugiego płynu jakim był syntetyczny czynnik firmy 3M noszący branżową nazwę HFE-7000. W pierwszej kolejności przedstawia parametry termofizyczne cieczy, a następnie przechodzi do opisu wyników badań przeprowadzonych analogicznie jak dla wody. Na zakończenie ponownie przedstawiony jest wykres zależności oporu cieplnego od stopnia wypełnienia wymiennika czynnikiem roboczym oraz prędkości obrotowej wału. Dla czynnika opracowanego przez firmę 3M uzyskano minimum funkcji w okolicy od $n=0$ obr/min do 100 obr/min i $FR < 60\%$. Ostatnim podrozdziałem Autor przedstawia walidację modelu matematycznego na podstawie uzyskanych wyników z badań doświadczalnych. Uzyskuje zbieżność na poziomie $< 10\%$ w zakresie niskich wartości prędkości obrotowej. Dla wyższych wartości prędkości zbieżność zostaje zaburzona, jednak charakterystyka przebiegu oporu cieplnego, w funkcji bezwymiarowej liczby Bond'a, zostaje zachowana (na przykładzie porównania wyników dla $FR=80\%$).

Praca zakończona jest rozdziałem szóstym, gdzie Autor treściwie przedstawia podsumowanie pracy oraz wnioski z przeprowadzonych działań badawczych. W pracy udowodniono, że możliwe jest wykorzystanie pulsacyjnych rurek ciepła dla celów chłodzenia w obrotowym układzie odniesienia. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono postawioną tezę pracy oraz uzyskano potwierdzenie tezy pomocniczej mówiącej o istnieniu minimum funkcji oporu cieplnego urządzenia w funkcji prędkości obrotowej. Cel pracy jakim było zbudowanie modelu matematycznego oraz jego walidacja, na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku badawczym, został osiągnięty. Doktorant określa 11 konkluzji osobno dla poszczególnych parametrów procesu oraz jedną wspólną dla stopnia wypełnienia oraz strumienia dostarczanego ciepła.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień związanych z wymianą ciepła rurkach ciepła w układzie nieinercyjnym. Z uwagi na pasywny charakter wymiany ciepła efektywność i ilość przenieszonego ciepła w rurce ciepła uzależnione jest przede wszystkim różnicy temperatur

roboczych, od typu i ilości czynnika roboczego, rodzaju, kształtu i typu zastosowanego knota. Istotą działania rurek ciepła jest realizowany w jej wnętrzu obieg termodynamiczny, w którym w procesie dostarczania ciepła czynnik roboczy zmienia stan skupienia z ciekłego na lotny, by w dalszej kolejności oddać pobrane wcześniej ciepła w skraplaczu i ponownie zmienić stan skupienia, tym razem z lotnego w ciekła. Proces ten zachodzi tak długo, jak długo różnica ciśnienia, powstała w strukturze porowatej, między sekcją odparowania, a kondensacji, będzie większa lub równa sumie różnicy ciśnienia pary oraz cieczy nasyconej. Z punktu widzenia efektywności energetycznej silnie pożądane jest intensyfikowanie procesu wymiany ciepła. Doktorant w swojej pracy proponuje zastosowanie pulsacyjnej rurki ciepła pracującej w układzie obrotowym. Dzięki temu generowana jest siła bezwładności, która działa wzdłuż kierunku normalnej do osi obrotu, zmieniając warunki transportu ciepła wewnątrz rurki. Przy określonej prędkości wartość oporu cieplnego pulsacyjnej rurki ciepła osiąga minimum.

Na podstawie przeglądu literatury Doktorant zauważył, że istnieją wyraźne braki wiedzy w zakresie zrozumienia mechanizmów zjawisk zachodzących w pulsacyjnych rurkach ciepła, zwłaszcza pracujących w pionowym układzie obrotowym. Doktorant podjął się zatem zagadnienia, które jest kluczowe, zwiększa bowiem bazę danych eksperymentalnych, uporządkowuje i częściowo uzupełnia wiedzę w zakresie wykorzystania pulsacyjnych rurek ciepła. Podejmowane przez Doktoranta kompleksowe ujęcie zagadnienia może być uznane za nowe i oryginalne.

Za osiągnięcia Doktoranta uważam:

- Zaprojektowanie i budowa stanowiska badawczego.
- Opracowanie planu prac pomiarowych.
- Wykonanie obszernych badań eksperymentalnych skoncentrowanych wokół wpływu zmiany mocy cieplnej, stopnia wypełnienia oraz prędkości obrotowej na wydajność termiczną pulsacyjnej rurki ciepła.
- Opracowanie wyników doświadczeń .
- Opracowanie jednowymiarowego modelu matematycznego dla pojedynczego zagięcia rurki.
- Uzyskanie ochrony patentowej na skalę krajową dla zastosowania pulsacyjnej rurki ciepła w układzie obrotowym.

Należy podkreślić, że prace badawcze, których wyniki prezentowane są w recenzowanej rozprawie doktorskiej wykonane zostały przez Doktoranta są odpowiedzią na potrzeby przemysłu. Oznacza to, że zagadnienie zastosowania pulsacyjnych rurek ciepła na cele chłodnicze cieszy się ogromnym zainteresowaniem. Jednocześnie, jest to dowód na to, że Doktorant doskonale radzi sobie pracując w zespole. Zrozumiał jest bowiem fakt, że prace dla przemysłu realizowane są nie indywidualnie lecz przez zespoły badawcze. Wyniki prac zostały opublikowane w renomowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej a opracowana konstrukcja badawcza objęta została ochroną patentową. Dowodzi to wysokiego poziomu naukowego i praktycznego badań realizowanych w ramach pracy doktorskiej.

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

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

V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki oraz charakteru. Bez wątplenia efektem naukowym rozprawy jest powiększenie zasobu wiedzy w zakresie intensyfikacji wymiany ciepła poprzez zastosowanie pulsacyjnej rurki ciepła. Przeprowadzone badania eksperymentalne na rurce ciepła w warunkach stacjonarnych oraz wirującej z określoną prędkością kątową stanowią ważne uzupełnienie bazy danych zawierającej jak dotąd ograniczone wyniki eksperymentalne. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane do walidowania istniejących modeli oraz budowania nowych modeli obliczeniowych rurek ciepła opartych na systematycznych pracach eksperymentalnych.

VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

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

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie podejmowanego zagadnienia. Bez wątplenia uzyskanie wyników przedstawionych w rozprawie wymagało znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mają w dużej mierze charakter porządkowy, stanowią jedynie komentarze bądź sugestie i nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

1. W rozdziale 3 zatytułowanym „Model numeryczny”, Doktorant pisze, że praca jest rozszerzeniem modelu zaproponowanego przez zespół Zhang i in., który dla pionowej pozycji u-rurki, w układzie stacjonarnym grzany od góry, analizował zjawiska towarzyszące wymianie ciepła. Zabrakło natomiast informacji czego proponowane przez Doktoranta rozszerzenie modelu dotyczy.
2. W rozdziale 3 pokazane zostały wyniki porównawcze prac Doktoranta z pracami Zhang i in. Jednakże, porównanie pokazano na oddzielnych rysunkach. Widać, że jakościowo oraz ilościowo (na tyle na ile można je ocenić na podstawie wykresów) wyniki są zgodne. Warto byłoby pokazać te porównania na jednym wykresie. Sugerowałbym również w dyskusji wyników podać parametry ilościowe opisujące zgodność wyników.
3. Na stronie 65. Doktorant w odniesieniu do rys. 3.20 stwierdza, że „czterokrotny wzrost wartości h_{fg} spowodował wzrost mocy skraplacza, aż o 90%”. Warto jednak uzupełnić tę informację, w której chwili czasowej obserwuje się ten wzrost. Rysunek 3.20 przedstawiający wyniki nie jest tak jednoznaczny.
4. Odwołując się do wyników pokazanych na rys. 3.21 Doktorant stwierdza, że „wynik pokrywa się z obserwacjami eksperymentalnymi”. Podobnie jak w komentarzu 2 sugerowałbym autorowi stosowanie parametrów ilościowych pozwalających ocenić tę zgodność. Również w rozdziale 5.3, gdzie dyskutowane jest porównanie wyników obliczeń i eksperymentalnych, warto byłoby, aby Doktorant zastosował wartości liczbowe, pokazujące zmiany parametrów o których mowa.
5. Podsumowując wyniki pokazane na rys. 3.21, Doktorant wyciąga wniosek, że *wzrost średnicy zwiększa powierzchnię wymiany ciepła oraz względną masę czynnika*

realizującego proces. Jest to oczywisty wniosek, który nie wymaga badań. W mojej opinii warto byłoby, aby Doktorant skierował uwagę na próbę wytłumaczenia zmniejszenia pulsacji wraz ze wzrostem średnicy rurki, co z resztą Autor pracy słusznie zauważył.

6. Na rys. 4.2 pokazane zostały lokalizacje czujników temperatury oznaczone jako: *zainstalowane* i *analizowane*. Nie wyjaśniono sensu i przyczyny takiego podziału, oraz jakie jest jego przełożenie na prezentowane wyniki.
7. Warto byłoby wskazać w pracy wkład Autora w opracowaniu oraz budowie stanowiska.
8. W równaniu 4.2, $Q = U \cdot I$, Autor pracy nie uwzględnił strat ciepła, które jak pisze „*są pomijalnie małe*”. Sugerowałbym w tym miejscu odwołać się do literatury lub własnych badań bądź analiz Doktoranta, na podstawie których przyjmuje się takie założenie.
9. Na stronie 89. przy opisywaniu warunków prowadzenia prac eksperymentalnych podano wartość liczbową optymalnej prędkości obrotowej $n = 150$ obr/min. Wcześniej w pracy Doktorant informował, że *może istnieć...*, *istnieje...*, *powinna być...* prędkość optymalna, tu pojawia się wprost wartość liczbowa, jak ją wyznaczono?
10. Na rys. 5.3 pokazano wyniki tylko dla wartości skrajnych tj. w warunkach stacjonarnych, przy $n = 0$ obr/min oraz przy maksymalnej prędkości obrotowej $n = 300$ obr/min, a nie pokazano wyników pomiarów dla prędkości optymalnej, tj. $n = 150$ obr/min. Czy wykonano pomiary przy $n = 150$ obr/min? Warto byłoby pokazać wyniki dla skrajnych warunków roboczych i tych najbardziej odpowiednich.
11. W rozdziale 5.3 Doktorant stwierdza, że z uwagi na aplikacyjny charakter stanowiska należało zaadoptować aparaturę badawczą do konstrukcji mieszalnika i z tego powodu zastosowana średnica, długość adiabaty i źródło grzania umieszczone u góry, nie mogły być zastosowane zgodnie z założeniami modelu matematycznego. Tą kwestię należałoby rozszerzyć.

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

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. W pracy, co zrozumiałe, znajduje się kilka niedociągnięć, jednakże poniżej zawarte uwagi i komentarze nie wpływają na moją jednoznacznie wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii.

- W spisie symboli niektóre skróty oraz znaczenia literowe pisane są kursywą, podczas gdy inne pisane są czcionką prostą.
- Autor stosuje oznaczenie mocy cieplnej jako Q wyrażanej w watach, podczas gdy zwyczajowo symbol ten oznacza energię cieplną wyrażaną w dżulach, natomiast zazwyczaj stosowany symbol strumienia ciepła (mocy cieplnej) \dot{Q} wyrażanej w watach autor używa do oznaczenia gęstości strumienia ciepła w W/m^2 . Może to utrudniać odbiór i zrozumienie wyników.
- Co oznacza symbol trzykropka na rys. 1.3?
- Tytuł podrozdziału 1.4.3 to *Ograniczenia*. Należałoby w sposób klarowny wyjaśnić czego te ograniczenia dotyczą?
- Dyplomant wielokrotnie w pracy używa słowa *optymalna*, odnosząc się do różnych parametrów: np. wielkość wypełnienia, prędkość obrotowa. W mojej opinii autor nadużywa tego słowa, rozumiem jednak, że pojęcie "optymalny" stosowane jest jako określenie rozwiązania w przekonaniu autora najkorzystniejszego, bez stosowania sformalizowanego aparatu optymalizacyjnego.

- W kilku miejscach w pracy, np. na str. 9 jednostka współczynnika przewodzenia ciepła zapisana jest w sposób W/mK. Taki zapis sugeruje, że mamy do czynienia z milikelwinem
- Sugerowałbym stosowanie podstawowej jednostki ciśnienia i jej wielokrotność zamiast bar.
- Do opisu zmian parametrów lub wielkości fizycznych proponuje stosowanie określeń typu „maleje”, „zmniejsza się”, „obniża się” zamiast określenia „spada” (np. na str. 12)
- Do oznaczenia czasu Doktorant stosuje grecką literę tau oraz literę *t*, co może być mylące z uwagi na fakt, że temperatura zwyczajowo oznaczana jest jako *t*.
- Na stronie 73 Doktorant pisze „doświadczenie autora wskazuje, że ponad 80 % energii zużywanej przez silnik jest zamieniane na ciepło i tylko częściowo odbierane z kadzi przy zastosowaniu chłodzenia płaszczowego”, przywołując dwie prace, których Doktorant nie jest autorem. Jak rozumiem, komentarz odnosi się do źródeł literaturowych a nie osobnych doświadczeń autora, które w pracy nie zostały ujęte. Jest to zatem niezręczność językowa.
- Doktorant zamiennie stosuje słowa *ilość* i *liczba*, np. na str. 83 pisząc o ilości punktów pomiarowych, co jest niepoprawne, gdyż *liczba* odnosi się do wielkości policzalnych, *ilość* natomiast do niepoliczalnych.

VII. Uwagi końcowe

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

VIII. Wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą istotny wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych procesów cieplno-przepływowych i wymiany ciepła. Świadczy to o ogólnej wiedzy teoretycznej a także o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Osiągnięcie Doktoranta stanowi w oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa, wypełnia ramy stawiane pracom doktorskim tak pod względem zakresu rzeczowego, jak i oryginalności osiągnięć poznawczych oraz metodycznych.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

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

Smwientew