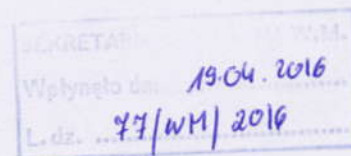


prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
profesor zwyczajny Politechniki Koszalińskiej
Katedra Techniki Ciepłej i Chłodnictwa
Politechnika Koszalińska

Koszalin, 15.04.2016 r.



R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Błauciaka nt.:

„Wpływ parametrów parownika z wypełnieniem porowatym na jego efektywność”

Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Dariusz Mikieliewicz zatrudniony na Wydziale Mechanicznym Politechniki Gdańskiej.

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej z dnia 21.03.2016 r. (L. dz. 42 WM/2016).

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 164 strony i jest podzielona na dziesięć rozdziałów. Dodatkowo podano wykaz literatury, spis oznaczeń, rysunków i tabel oraz jedenaście załączników. W rozprawie zawarto:

1. **Wstęp**, gdzie ogólnie scharakteryzowano poszukiwanie najefektywniejszych sposobów odbierania i przenoszenia energii cieplnej. Szczególną uwagę skierowano na możliwości pasywnego transportu ciepła, w tym wykorzystanie termosyfonu prostego i jego modyfikacji. Wskazano na rurki ciepła z wypełnieniem porowatym (HP), obiegi z pompowaniem kapilarnym (CPL) i obiegowe rurki ciepła (CLP).
2. **Przegląd pasywnych urządzeń do przenoszenia ciepła**. Podano opis rozwoju pasywnych zamkniętych systemów przenoszenia ciepła. Oceniono przydatność wykorzystania przemian fazowych wrzenia i skraplania do intensyfikacji wymiany ciepła i masy. Podkreślono w tym procesie duże znaczenie układów z pompowaniem kapilarnym w wypełnieniu porowatym.
3. **Przegląd literatury dotyczącej modelowania pracy rurki ciepła z pętlą obiegową (LHP)**, na której Autor oparł swoje rozważania. Zwrócono uwagę na podejmowane w różnych ośrodkach naukowych próby opracowania propozycji opisanie i znalezienia najodpowiedniejszego rozwiązania konstrukcyjnego oraz zbudowania modelu matematycznego procesów tam zachodzących.
4. **Teza, cel i zakres pracy**.
5. **Szczegółowy opis stanowiska badawczego**, a w tym właściwości zastosowanych czynników chłodniczych, dane techniczne głównych elementów oraz oprzyrządowania stanowiska i jego opomiarowania. Przedstawiono procedurę wykonywania badań eksperymentalnych oraz analizę błędów pomiarowych.

6. **Szczegółowy opis badań eksperymentalnych parownika z wypełnieniem porowatym.** Szczególną uwagę zwrócono na procedury badawcze i zapewnienie szczelności układu.
7. **Wyniki badań doświadczalnych płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z wypełnieniem porowatym.** Wyznaczono rozkłady ciśnienia i temperatury w poszczególnych punktach badanego obiegu oraz masowe natężenie przepływu czynników chłodniczych. Opracowano także charakterystyki cieplno-przepływowe badanego wymiennika ciepła.
8. **Własny model obliczeniowy dla parownika z przepływem wywołanym siłami kapilarnymi,** w tym porównanie rezultatów przeprowadzonych obliczeń z wynikami badań eksperymentalnych.
9. **Koncepcja płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z wypełnieniem porowatym,** który można wykorzystać do wspomagania pracy pompowania w obiegu mikrośrodku w funkcji parownika.
10. **Wnioski i zalecenia dla przyszłych prac,** gdzie Doktorant zawarł w punktach opis zrealizowanych prac badawczych, osiągniętych celów naukowych i możliwości dalszych badań.
11. **Rozprawę kończy spis literatury i jedenaście załączników,** które zawierają model obliczeniowy kłota, schematy wykonawcze stanowiska badawczego i sekcji parownika, model ideowy wymiennika płaszczowo-rurowego z wypełnieniem porowatym, wyniki badań eksperymentalnych o obliczenia dotyczące strat ciepła w instalacji badanego obiegu.

2. Teza pracy

Doktorant w rozdziale czwartym podał cel, zakres swojej pracy i tezę, twierdząc, że „*możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie prototypu wymiennika ciepła o konstrukcji płaszczowo-rurowej z wypełnieniem porowatym, który pracując w obiegu termodynamicznym wspomagałby ruch płynu, wynikający z przyłożonego do wymiennika strumienia ciepła*”. Mając na uwadze udowodnienie powyższej tezy Doktorant opracował koncepcję budowy i propozycję wykonania prototypu wymiennika oraz stanowiska badawczego. Przeprowadził systematyczne badania eksperymentalne w zakresie możliwości pompowych rurek z wypełnieniem porowatym oraz zachowania się wymiennika stanowiącego element składowy w obiegu termodynamicznym wypełnionym alternatywnie dwoma rodzajami czynnika chłodniczego, to znaczy wodą destylowaną i etanolem. Opracował model teoretyczny opisujący działanie pojedynczej rurki z wypełnieniem porowatym powodującym przepływ czynnika oraz współpracę układu takich rurek. Prezentowany model zweryfikował porównując wyniki obliczeń teoretycznych z wynikami własnych badań eksperymentalnych. Poprzez realizację wyżej wymienionego zakresu prac Doktorant w pełni uzasadnił postawioną tezę swojej pracy.

3. Rozwinięcie tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska odnosi się do wymiany ciepła, pędu i masy w urządzeniach, w których transport medium roboczego w kierunku przeciwnym do działającej siły grawitacji wspierany jest powstawaniem ciśnienia kapilarnego w ośrodku porowatym. Wykorzystanie tego zjawiska umożliwia pasywny transport energii cieplnej, przy jednoczesnym minimalizowaniu strat przesyłowych i przy niewielkim gradiencie temperatury dolnego i górnego źródła ciepła. Jest to bardzo istotne w przypadku miniaturyzacji urządzeń, które w ostatnich latach znajdują coraz większe zastosowanie, np. w konstrukcjach komputerów dużej mocy. Powoduje to potrzebę prowadzenia dalszych badań eksperymentalnych i teoretycznych w tym zakresie. Doktorant opisał, po krótkim wprowadzeniu (na podstawie przeglądu literatury), możliwości pasywnego transportu ciepła oraz dokonał przeglądu rozwiązań

konstrukcyjnych stosowanych urządzeń. Szczególną uwagę zwrócono na mechanizm transportu czynnika roboczego w rurkach ciepła z wypełnieniem porowatym (HP), obiegach z pompowaniem kapilarnym (CPL) i w obiegowych rurkach ciepła (CLP). Przeprowadzono szczegółową analizę w zakresie modelowania pracy rurki ciepła z pętlą obiegową (LHP), na której Doktorant oparł swoje rozważania. Dotyczyły one analizy stanu ustalonego i nieustalonego pracy urządzenia. Analiza modeli obliczeniowych różnych autorów wykazała, że opis zjawisk zachodzących w rurkach ciepła jest niepełny i istnieje potrzeba prowadzenia dalszych prac badawczych w tym zakresie. Mając powyższe na uwadze, Doktorant przeprowadził własne prace badawcze w zakresie wpływu parametrów konstrukcyjnych oryginalnego parownika o konstrukcji płaszczowo-rurowej z wypełnieniem porowatym na jego efektywność w obiegu termodynamicznym. Zaprojektował i zbudował stanowisko badawcze, przeprowadził dobór czynnika chłodniczego i rodzaju wypełnienia porowatego. Badania wykonał wykorzystując wypełnienie porowate w postaci spieku ze stali nierdzewnej, o tej samej długości średnicy z różnymi średnicami porów (1, 3 i 7 μm dla dwóch różnych czynników roboczych (woda i etanol) i trzech napełnień rurek czynnikiem roboczym (60, 65 i 70 ml). W ramach systematycznych badań określono przydatność zastosowania rurek z wypełnieniem porowatym do budowy wymiennika przeznaczonego do zastosowania w obiegu termodynamicznym, zwłaszcza w układzie ORC mikrośilowni domowej. Potwierdził, że istnieje optymalna wartość ilości czynnika wypełniającego objętość instalacji obiegu, przy której wydajność parownika jest największa. Przeprowadzono również badania parownika z knotem podczas: rozruchu, w stanie ustalonym oraz ze zmiennym obciążeniem. Wykorzystując wnioski z własnych badań eksperymentalnych i przeglądu literatury Autor opracował model teoretyczny pracy pojedynczej rurki i układu rurek z wypełnieniem porowatym, które powodują przepływ czynnika w instalacji. Uzyskane wyniki z obliczeń teoretycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych uzyskując zadowalającą zgodność. Efektem końcowym prowadzonych prac badawczych jest opracowanie wstępnego projektu wymiennika ciepła z wypełnieniem porowatym, co pozwoliło na zgłoszenie wniosku o udzielenie patentu na koncepcję parownika wspomaganego siłami kapilarnymi. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac badawczych należy uznać jako pozytywne.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Prezentowana rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia w energetyce dotyczącego transportu energii cieplnej w miniinstalacjach energetycznych. Poszukuje się efektywnych rozwiązań w zakresie opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, wykorzystania dotychczas pomijanych zjawisk fizycznych, jak również nowych substancji, które mogą być wykorzystane jako czynniki robocze w mini-instalacjach realizujących prawo- i lewobieżne obiegi termodynamiczne. Dlatego temat i zakres ocenianej rozprawy doktorskiej należy uznać jako nowatorski, o dużej oryginalności i wartościach poznawczych. Istnieje bowiem jeszcze stosunkowo mała liczba opublikowanych prac w zakresie niekonwencjonalnych metod pasywnego transportu energii cieplnej w mini-układach energetycznych. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie jest oryginalnym wkładem w rozwój nowoczesnych konstrukcji wymienników ciepła. Niewiele jest bowiem rozwiązań konstrukcyjnych opartych na zjawisku podciągania kapilarnego cieczy w ośrodkach porowatych. Prezentowane wyniki badań eksperymentalnych, uzyskane w wyniku bardzo starannie przeprowadzonych pomiarów stanowią znaczący wkład Autora w lepsze poznanie tego procesu. Stanowią nową bazę danych doświadczalnych w postaci rozkładu temperatury i ciśnienia oraz charakterystyk przepływowych instalacji obiegu termodynamicznego. Dotyczy to również modelowania matematycznego, które przyczyniło się niewątpliwie do postępu w opisie fizyki zjawiska. Należy zwrócić uwagę na

oryginalny wkład Doktoranta w opracowanie projektu oraz technologii wykonania i zbudowania oryginalnego stanowiska badawczego. Pokonane zostały trudności z uzyskaniem bardzo dobrej szczelności, wielokrotnie rozbieranej i montowanej instalacji badawczej, z zapewnieniem właściwej dokładności pomiarów i oceną błędów pomiarowych. Uzyskane i przedstawione wyniki badań stanowią podstawę do wytyczenia kolejnych kierunków badawczych zastosowania wymienników płaszczowo-rurowych z wypełnieniem porowatym.

5. Wartości użytkowe pracy

Praca ma niewątpliwie walor aplikacyjny i dotyczy badania możliwości zaprojektowania i wykonania nowego oryginalnego wymiennika o konstrukcji płaszczowo-rurowej z wypełnieniem porowatym, który pracując w obiegu termodynamicznym (np. obiegu ORC) wspomagałby ruch płynu wykorzystując siły kapilarne. Przeprowadzone badania eksperymentalne i analizy teoretyczne pozwoliły na opracowanie wstępnego projektu takiego wymiennika, który umożliwi przepompowanie etanolu w ilości 0,01 kg/s przez układ 18 modułów, każdy składający się z siedmiu rurek z wypełnieniem porowatym. Zastosowanie tego układu umożliwi zaoszczędzenie ok. 3 W mocy pompowania. Również na uwagę zasługuje oryginalny pomysł wykorzystania struktury porowatej do wspomagania parownika mikrośilowni domowej ORC, gdzie głównym wyzwaniem obiegu jest zbyt duża różnica ciśnień do pokonania w obiegu przez pompę obiegową. Na podstawie obliczeń Doktorant wykazał, że w wymienniku ciepła siły kapilarne są w stanie zabezpieczyć cyrkulację płynu w obiegu ORC. Oznacza to, że pompa cyrkulacyjna działa w celu wyrównania spadku ciśnienia powodowanego spadkiem entalpii w turbinie a wypełnienie porowate pokrywa zapotrzebowanie energii potrzebnej do przetłoczenia czynnika w linii transportu cieczy i pary oraz knocie. Rozwiązania takie mogą być również z powodzeniem wykorzystane w innych układach, np. obiegach chłodniczych czy instalacjach klimatyzacyjnych. Prezentowana rozprawa ma również aspekt ekologiczny. Przedstawione trendy rozwoju nowych konstrukcji z pewnością przyczynią się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla, zmniejszając zużycie energii elektrycznej, co w pozytywny sposób wpłynie na ochronę środowiska naturalnego człowieka.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Doktorant bardzo wnikliwie i starannie przeprowadził analizę literatury w zakresie pasywnych urządzeń do przenoszenia ciepła (rozdział 2) i modelowania pracy obiegowych rurek ciepła LHP (rozdział 3). Przedstawił różne rozwiązania konstrukcyjne i modele teoretyczne opisujące zasadę ich działania. Brak jest jednak uogólnienia prowadzonych analiz w postaci krótkich podsumowań i przedstawienia wniosków odnośnie aktualnego stanu wiedzy i kierunku dalszych badań.
2. Na stronie 98 podano, że zastosowanie nowego rodzaju wymiennika wykonanego według opracowanego projektu umożliwi przepompowanie etanolu w ilości 0,01 kg/s, co umożliwi zaoszczędzenie mocy pompowania w ilości około 3 W. Wskazany kierunek jest słuszny. Jednak czytelnik nie został poinformowany jak to się ma w stosunku do całej mocy pompowania i wydajności cieplnej wymiennika. Czy efekt ten będzie zauważalny i rzeczywiście przyczyni się do znacznych oszczędności?

3. W przypadku analizy obiegów termodynamicznych ważna jest ich ocena pod względem sprawności. Czy Doktorant ma pomysł na wprowadzenie jakiejś zależności pozwalającej ocenić sprawność całego rozwiązania?
4. W temacie pracy podano, że badania dotyczą wpływu parametrów parownika na jego efektywność. Jak Doktorant rozumie pojęcie efektywności wymiennika z wypełnieniem i jakie kryteria porównawcze obejmuje pojęcie „efektywność”?
5. Czy dysponując wynikami badań dla dwóch różnych czynników roboczych, tj. wody destylowanej i etanolu można podjąć próbę ich odniesienia na inne rodzaje czynników? Jest to istotne zagadnienie, bowiem toczy się nadal dyskusja nad wyborem czynników roboczych w obiegach ORC. Woda raczej do takich nie należy.

Uwagi edytorskie

Uwagi ogólne:

1. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Praca została napisana profesjonalnie. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu.
2. Praca zyskałaby jeszcze bardziej na jakości edytorskiej, gdyby Autor wprowadził opcję dzielenia wyrazów, co usunęłoby niekiedy zbyt długie odstępy pomiędzy wyrazami. Ponadto należy zwracać uwagę, aby na końcu wiersza nie pozostawała wolna litera. Ładniej jest edytorsko, kiedy znajduje się ona na początku wiersza przed wyrazem, któremu towarzyszy.
3. W niektórych miejscach występują błędy interpunkcji, brak jest przecinków itp.
4. Autor w tekście pracy podając liczby stosuje zamiennie kropki lub przecinki, aby oddzielić część całkowitą liczby od ułamkowej. W języku polskim stosujemy przecinki.
5. W wykazie oznaczeń część indeksów podano w języku polskim, a część w języku angielskim. W polskich opracowaniach podajemy nazwy i indeksy w języku polskim.
6. W podpisach rysunków i tablic nie stosuje się kropek na końcu zdania.

Uwagi szczegółowe

1. Co Autor ma na myśli podając przepuszczalność knota w m^2 ?
2. Na stronie 9, 4 wiersz od dołu - jest „miedzy”. Powinno być „między”.
3. Na stronie 29, w nagłówku tabeli 3.2 - jest „study”. Powinno być „stany”.
4. W Tabeli 5.1 podano temperaturę wrzenia nie dodając, że dotyczy to ciśnienia normalnego.
5. Na stronie 84, 1 wiersz od dołu: „...przenoszenie ciepła z prędkością u_v , co powoduje efektywne przewodzenie ciepła w wypełnieniu porowatym. Jest to określenie niepoprawne. Prędkość u_v dotyczy przepływu substancji, która transportuje energię cieplną.
6. W wykazie oznaczeń podano, że porowatość knota ε wyznaczana jest w procentach. Z modelu na stronie 85 wynika, że jest ona podawana liczbowo w zakresie $\varepsilon = 0 \div 1$.
7. Na stronie 90, 5 wiersz od dołu - jest „...w funkcji temperatury powierzchni zewnętrznej powierzchni parownika...”. Powinno być „...w funkcji temperatury zewnętrznej powierzchni parownika...”.
8. Na stronie 92, 9 wiersz od góry, występuje nie zrozumiałe wyrażenie: „Zwrócono więc uwagę na możliwość skonstruowania wymiennika ciepła wykorzystującego siły kapilarne do wspomagania pracy pompowania mokrosiłowni w funkcji parownika”.

7. Uwagi końcowe

Praca napisana jest bardzo zwięźle i w sposób zrozumiały. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy.

8. Wniosek do Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu techniki cieplnej przy prowadzeniu badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych. Praca stanowi oryginalny wkład do badań wymiany ciepła, pędu i masy w miniinstalacjach energetycznych z wymiennikami o niekonwencjonalnej innowacyjnej konstrukcji. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Krzysztofa Błauciaka jako rozprawy doktorskiej spełniającej wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym i o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

