



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Zakład Techniki Ciepłej i Chłodnictwa
Wydział Mechaniczny
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok
tel. 571 443 089
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 19.12.2015

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Gil

„Badanie możliwości wykorzystania wybranych czynników chłodniczych w strumienicowym, kompaktowym klimatyzatorze z napędem słonecznym”

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej, pismo W9/PW/1348/2015 z dnia 03 listopada 2015.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Dr hab. inż. Jacek Kasperski, Prof. nadzw. Politechniki Wrocławskiej.

I. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 143 strony. Praca składa się z następujących części: wykazu ważniejszych oznaczeń, wstępu, przeglądu literatury zawartego w Rozdziałach 1÷5, uzasadnienia podjęcia tematu, celu, tezy i zakresu pracy, właściwych rozdziałów pracy doktorskiej: Rozdziały 8÷11, wniosków końcowych, załącznika, spisu tabel i rysunków oraz wykazu literatury. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor ogólnie scharakteryzował potrzebę rozwoju systemów chłodniczych oraz wykorzystania energii odnawialnej do ich napędu. Dokonał klasyfikacji tych systemów ze względu na możliwość zasilania energią promieniowania słonecznego oraz w sposób syntetyczny przedstawił zalety płynące z powyższego rozwiązania. We wprowadzeniu po krótko przedstawiony został również zasadniczy cel realizowanej pracy doktorskiej.
2. **Strumienice**. Rozdział ten, podzielony został na cztery podrozdziały, w których Doktorant kolejno przedstawia budowę i zasadę działania strumienicy oraz chłodniczego obiegu strumienicowego, opisuje parametry pracy strumienicy, a także prezentuje podział obiegów strumienicowych na pompowe i grawitacyjne. W rozdziale tym Doktorant scharakteryzuje podstawowe pojęcia opisujące efektywność pracy strumienicy i obiegu strumienicowego.
3. **Stan badań w literaturze światowej**. Zawarto w nim zwięzły opis prac z zakresu urządzeń strumienicowych z ich podziałem na główne nurty badawcze.
4. **Modele obliczeniowe strumienic chłodniczych**. W rozdziale tym opisano zasadnicze równania oraz założenia przyjmowane w większości modeli obliczeniowych.

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 29.12.2015r.

W9/PW/1613/2015

1 z 12

Przedstawiono również opis wybranych modeli analitycznych i numerycznych strumienic chłodniczych jedno- i dwufazowych.

5. **Kryteria doboru czynnika roboczego.** W rozdziale przedstawiono własności czynników roboczych, jakie powinny być spełnione celem uzyskania wysokiej efektywności pracy omawianego systemu strumienicowego. Zostały przedstawione czynniki robocze stosowane w strumienicowych układach chłodniczych na przestrzeni ostatnich lat.
6. **Uzasadnienie podjęcia tematu,** w którym Doktorant wyciąga wnioski płynące z dokonanego przeglądu literatury oraz identyfikuje stawiany w pracy doktorskiej problem naukowy.
7. **Cel, teza i zakres pracy.** W rozdziale tym Doktorant sformułował zasadniczy cel pracy, a także tezę oraz uszczegółowił zakres realizowanej pracy doktorskiej.
8. **Kompaktowy chiller małej mocy z chłodniczym obiegiem strumienicowym.** W rozdziale przedstawiono własną koncepcję realizacji kompaktowego chillera małej mocy z chłodniczym obiegiem strumienicowym.
9. **Analizy obiegów chłodniczych dla wybranych czynników roboczych.** Rozdział ten stanowi zasadniczą część analityczną rozprawy, w którym zaprezentowano model matematyczny obiegu strumienicowego, opis właściwości substancji wytypowanych do analiz, a także uzyskane rezultaty.
10. **Badanie procesu wrzenia alternatywnych czynników chłodniczych dla obiegów strumienicowych.** W rozdziale przedstawiono opis oraz wyniki badań eksperymentalnych procesu wrzenia w objętości i odparowania filmów cieczowych dla wybranych węglowodorów i rozpuszczalników organicznych.
11. **Analiza porównawcza wariantów realizacji obiegu strumienicowego dla czynników palnych.** W rozdziale tym przeanalizowano warianty budowy obiegu chłodniczego. Dla wybranej koncepcji przeprowadzono analizę napełnienia układu czynnikiem roboczym.
12. **Wnioski końcowe.** W rozdziale tym w sposób syntetyczny podsumowano uzyskane w rozprawie wyniki oraz sformułowano najistotniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań.
13. **Załącznik,** w którym zestawiono zasadnicze parametry charakteryzujące badania opublikowane w publikacjach naukowych z ostatnich 10 lat.
14. **Spis literatury** zawierający 201 pozycji literatury, obejmujący zarówno pozycje klasyczne, jak również najnowsze publikacje, głównie z renomowanych czasopism międzynarodowych. W spisie literatury znalazło się 13 pozycji książkowych, 171 artykułów naukowych, 5 referatów konferencyjnych oraz 12 innych źródeł. 143 cytowane opracowania pochodzą z ostatnich 10 lat. Autor cytuje 9 własnych publikacji.

II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował następująco cel rozprawy w Rozdziale 7: "Opracowanie modelu matematycznego oraz badania eksperymentalne parametrów pracy strumienicowego, kompaktowego klimatyzatora z napędem słonecznym przy zastosowaniu wybranych czynników chłodniczych z grupy węglowodorów albo rozpuszczalników organicznych". W Rozdziale 7 Doktorant sformułował szczegółowy zakres rozprawy, który obejmuje:

- przeprowadzenie analizy literaturowej w zakresie realizowanej tematyki;
- przedstawienie idei kompaktowego klimatyzatora strumienicowego;
- opracowanie modelu matematycznego strumienicy;
- analizy modelowe;
- budowę stanowiska eksperymentalnego do badań procesu wrzenia analizowanych substancji roboczych na powierzchni płaskiej i przeprowadzenie badań wstępnych;

- budowę stanowiska eksperymentalnego i przeprowadzenie badań doświadczalnych mających na celu wyznaczenie współczynników wnikania ciepła podczas wrzenia analizowanych substancji podczas ich spływu cienkim filmem po powierzchni rur poziomych;
- analizę pracy i napełnienia czynnikiem solarnego strumienicowego klimatyzatora;
- podsumowanie.

Cel oraz zakres rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie układów strumienicowych. Należy wziąć pod uwagę, że w dostępnej literaturze brak jest systematycznej oraz kompleksowej analizy w zakresie doboru czynników roboczych z grupy węglowodorów oraz rozpuszczalników dla układów chłodniczych strumienicowych. W rozprawie podejmuje się zagadnienia powyższe w szerszym kontekście, biorąc również uwarunkowania w zakresie rozwiązania klimatyzatora strumienicowego i jego napełnienia czynnikiem roboczym, a także zagadnienia związane z wymianą ciepła w procesie wrzenia wraz z propozycją rozwiązania wymienników ciepła dla rozważanego klimatyzatora.

Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac o charakterze analitycznym oraz eksperymentalnym zaproponowany przez Doktoranta ze sformułowanym celem zasadniczo koresponduje. Należałoby się wprawdzie spodziewać przy powyżej sformułowanym celu raczej przeprowadzenia badań eksperymentalnych, przynajmniej w minimalnym zakresie, badań eksperymentalnych pracy strumienicowego układu chłodniczego, zaś w rozprawie zamieszczono badania eksperymentalne procesów wrzenia kilku czynników roboczych dla przypadków wrzenia w objętości oraz odparowania filmów cieczowych. Istnieje jednak wykazany w rozprawie czytelny związek pomiędzy przeprowadzonymi badaniami eksperymentalnymi a zaproponowanym rozwiązaniem klimatyzatora pracującego z węglowodorem.

W Rozdziale 7 zaprezentowano następującą tezę: „Możliwa jest realizacja strumienicowego, kompaktowego klimatyzatora z napędem słonecznym przy zastosowaniu wybranych czynników chłodniczych, w szerokim zakresie temperatur pary napędowej i przy małym napełnieniu”. W moim przekonaniu zaproponowana teza z jednej strony może być rozumiana jako stwierdzenie o dość oczywistym charakterze, bowiem dla szerokiego kręgu różnych substancji roboczych działanie układu chłodniczego strumienicowego fizycznie jest możliwe. Z drugiej jednakże strony – można byłoby oczekiwać udowodnienia tak postawionej tezy poprzez budowę oraz eksperymentalną weryfikację działania rozważanego klimatyzatora dla wybranych czynników chłodniczych, co nie zostało objęte zakresem pracy. W pracy rozważono jednakże w sposób szczegółowy konsekwencje doboru wybranych grup płynów roboczych, przeanalizowano ich zastosowanie w rozważanym klimatyzatorze, tak więc w tym sensie można w moim przekonaniu uznać, że zaproponowany zakres rozprawy umożliwił udowodnienie tak postawionej tezy.

Podsumowując - w moim przekonaniu zawarty w recenzowanej rozprawie doktorskiej materiał badawczy w postaci kompleksowo przeprowadzonych analiz teoretycznych oraz wyników badań eksperymentalnych odpowiada sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy i w pełni umożliwia udowodnienie postawionej w rozprawie tezy.

III. Treść rozprawy

We Wstępie Doktorant w sposób ogólny scharakteryzował potrzebę rozwoju układów chłodniczych i zwiększenia poziomu wykorzystania odnawialnych źródeł energii do celów ich napędu, w tym zwłaszcza energii promieniowania słonecznego. Przedstawiono także w zarysie działanie strumienicowego układu chłodniczego.

W Rozdziale drugim Doktorant zaprezentował budowę i działanie strumienicy parowej. Zaprezentowano zasadę działania strumienicowego układu chłodniczego oraz zdefiniowano jego efektywność energetyczną. Przeanalizowano wpływ zmian poszczególnych temperatur obiegu (parowania, skraplania i wytwarzania pary napędowej) na efektywność pracy strumienicy w obszarze projektowym oraz pozaprojektowym. Dokonano klasyfikacji oraz charakterystyki układów strumienicowych wyróżniając układy pompowe oraz grawitacyjne.

W Rozdziale trzecim przedstawiono aktualny przegląd literatury w zakresie układów chłodniczych strumienicowych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu prac Doktorant zidentyfikował brak wystarczających badań w zakresie wykorzystania alternatywnych czynników chłodniczych w obiegach strumienicowych, a zwłaszcza różnych węglowodorów oraz rozpuszczalników organicznych.

W Rozdziale czwartym zaprezentowano dotychczasowe podejścia w zakresie modelowania pracy strumienicy parowych dla układów chłodniczych. Doktorant przedstawił podstawowe równania stosowane w opisie zjawisk wymiany pędu i energii w strumienicach parowych wraz z najczęściej przyjmowanymi założeniami. Doktorant omówił zarówno dotychczas formułowane modele analityczne, jak również numeryczne. Doktorant uzasadnił zastosowanie modelu zaproponowanego przez Huanga i in. (1999) do przeprowadzonych w rozprawie analiz pracy układu strumienicowego dla wybranych grup czynników roboczych.

W Rozdziale piątym Doktorant przeanalizował kryteria, jakie powinien spełniać idealny czynnik chłodniczy, a w tym kryteria termodynamiczne, użytkowe oraz ekologiczne. Przedstawiono własności termodynamiczne czynników roboczych wpływające na efektywność energetyczną układu chłodniczego strumienicowego. W sposób szczegółowy przeanalizowano stosowane dotąd płyny robocze w układach chłodniczych strumienicowych.

Rozdział szósty rozprawy stanowi podsumowanie przeglądu literatury, w którym Doktorant uzasadnił motywacje skłaniające go do podjęcia badań w przedmiotowym zakresie. W Rozdziale siódmym Doktorant sformułował cel, zakres oraz tezę rozprawy, do których odniosłem się w punkcie II mojej recenzji. Kolejne rozdziały zawierają materiał stanowiący własny, oryginalny wkład Doktoranta w rozwój wiedzy w zakresie układów chłodniczych strumienicowych.

W Rozdziale ósmym Doktorant zaprezentował własną koncepcję klimatyzatora o małej wydajności chłodniczej z zastosowaniem obiegu strumienicowego. Przedstawione rozwiązanie zostało objęte zgłoszeniem patentowym. Na bazie tego rozwiązania Doktorant przeprowadza dalsze prace analityczne i eksperymentalne wykorzystania nowych, palnych czynników roboczych w obiegach strumienicowych.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono właściwe wyniki analizy pracy obiegu strumienicowego dla wybranych czynników roboczych. Szczegółowo omówiono zastosowany

model matematyczny strumienicy Hunaga i in. (1999) opisujący działanie strumienicy parowej (gazowej) w warunkach projektowych, tj. dla wydatków krytycznych obydwu strumieni: napędowego oraz zasysanego. Zaprezentowano czynniki wytypowane do analiz modelowych: węglowodorów, ogólnodostępnych czynników organicznych oraz wybranych niepalnych czynników syntetycznych. Poddano analizie łącznie 20 czynników roboczych. Zaprezentowano uzyskane wyniki obliczeń modelowych w zakresie stosunków kompresji i ekspansji, stosunku zasysania strumienicy oraz efektywności energetycznej cieplnej strumienicowego urządzenia chłodniczego osobno dla każdej z grup substancji. Na podstawie wyników analizy efektywności energetycznej cieplnej Doktorant dokonał przydatności poszczególnych czynników roboczych oraz możliwości ich stosowania w określonych zakresach temperatury pracy generatora pary. Przeanalizowana została również zaproponowana przez Doktoranta efektywność energetyczna mechaniczna obiegu strumienicowego odniesiona do mocy napędowej pompy skroplin. Podobnie jak w przypadku efektywności energetycznej cieplnej - Doktorant przedstawił wykresy efektywności energetycznej mechanicznej w funkcji temperatury pary napędowej.

Rozdział dziesiąty Doktorant poświęcił badaniom eksperymentalnym procesu wrzenia wybranych czynników roboczych. Scharakteryzowano proces wrzenia w objętości. Przedstawiono wybrane korelacje służących do obliczenia współczynników wnikania ciepła podczas realizacji w procesie wrzenia. Doktorant przedstawił budowę stanowiska badawczego wykorzystanego we własnych badaniach eksperymentalnych do badań wymiany ciepła w warunkach wrzenia w objętości. Przedstawiono metodologię prowadzenia badań w tym zakresie wraz z analizą niepewności pomiarowych dla uzyskanych wyników. Uzyskane eksperymentalnie wartości współczynnika wnikania ciepła dla badanych substancji zostały porównane z wybranymi zależnościami eksperymentalnymi dostępnymi w literaturze. Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant wyciągnął wniosek, że dla wszystkich badanych węglowodorów wyższych uzyskał on zbliżone wartości współczynnika wnikania ciepła, zaś analizowane zależności eksperymentalne nie pozwalają na dokładną predykcję wartości współczynników wnikania ciepła przy wrzeniu w objętości dla tych substancji. W dalszej części tego rozdziału Doktorant przeanalizował parametry wpływające na proces wymiany ciepła oraz wartość współczynnika wnikania ciepła w warunkach odparowania filmu cieczowego spływającego po rurze poziomej. Zaprezentowano budowę stanowiska badawczego, procedurę badawczą oraz analizę niepewności pomiarowych. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych zostały porównane z wynikami otrzymanymi za pomocą wzoru Parkena. Doktorant zaproponował współczynniki korekcyjne do tej zależności.

W Rozdziale 11 przedstawiono rozwiązania koncepcyjne klimatyzatora strumienicowego z wykorzystaniem czynników palnych. Przedstawione zostały cztery warianty realizacji obiegu: z bezpośrednim odparowaniem czynnika w parowniku i wytwornicy pary, z pośrednim odparowaniem czynnika w obiegu napędowym, z pośrednim odparowaniem czynnika w obiegu chłodniczym oraz układ z dwoma obiegami pośredniczącymi, zarówno po stronie wytwornicy pary jak i parownika. Dla każdego z wariantów w zwięzły sposób zaprezentowano jego wady i zalety. Doktorant przeprowadził analizę napełnienia układu czynnikiem chłodniczym. Jako analizowany wariant wykorzystano obieg z pośrednim odparowaniem czynnika w obiegu napędowym i chłodniczym, spójny z koncepcją klimatyzatora o małej wydajności chłodniczej, którą zaprezentowano w Rozdziale 8. Doktorant przedstawił także zastosowanie ociekowych wymienników ciepła w takim klimatyzatorze. Na podstawie uzyskanych wyników zaproponował analizę napełnienia układu czynnikiem chłodniczym dla n-pentanu jako przykładowego czynnika palnego czynnika

R-141b jako czynnika porównawczego. Doktorant podsumował uzyskane wyniki stwierdzając, że „możliwa jest budowa układu klimatyzacji strumieniowej z wykorzystaniem palnych, bezpiecznych środowiskowo, alternatywnych czynników chłodniczych, przy zaleceniu optymalnego doboru punktu pracy oraz realizacji układu w wariancie pośredniego odparowania czynnika”.

Rozprawę kończy jej podsumowanie, odnoszące się w szczególności do wyników zamieszczonych oraz dyskutowanych w Rozdziałach 9÷11.

IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy

Recenzowana rozprawa dotyczy zagadnień związanych z zastosowaniem strumieniowych układów chłodniczych o napędzie cieplnym pochodzącym z kolektorów słonecznych, a więc strumieniowej klimatyzacji solarnej. W rozprawie podjęto zagadnienie oceny efektywności energetycznej dla szerokiej grupy czynników roboczych, a w tym węglowodorów, rozpuszczalników organicznych oraz niektórych czynników syntetycznych o niskim wskaźniku tworzenia efektu cieplarnianego GWP, co niewątpliwie w istotny sposób poszerzyło i uzupełniło stan wiedzy w tym zakresie, bowiem brak było w literaturze analizy uwzględniającej tak szeroki zakres płynów roboczych. W ramach rozprawy podjęto także zagadnienia dotyczące wrzenia wybranych czynników roboczych z grupy węglowodorów oraz rozpuszczalników organicznych w warunkach wrzenia w objętości oraz odparowania strug cieczech napływających na poziome rury. Zwłaszcza dla ostatniego przypadku należy uznać prezentowane rezultaty za rozszerzające wiedzę, bowiem istnieje stosunkowo niewielka ilość danych eksperymentalnych dla rozpatrywanych płynów roboczych. Jako oryginalną należy w moim przekonaniu także uznać analizę napełniania układu chłodniczego czynnikiem roboczym.

W rozprawie podjęto zatem zagadnienia zastosowania wybranych grup czynników roboczych w sposób wielowątkowy, uzyskując w pełni oryginalny materiał badawczy w sposób istotny poszerzający istniejący stan wiedzy. Rozpatrzono bowiem nie tylko dobór czynników roboczych aspekcie efektywności energetycznej w jak dotąd nie podejmowanym zakresie, lecz także podjęto zagadnienia dotyczące wymogów formalnych oraz technicznych związanych z zastosowaniem czynników roboczych palnych i wybuchowych. W tym aspekcie podjęto zagadnienia minimalizacji napełnienia instalacji czynnikiem roboczym, możliwych do zastosowania konfiguracji układu, a także doboru wymienników ciepła (generatora pary i parownika) oraz badania eksperymentalne wymiany ciepła dla wybranej grupy czynników roboczych.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie analizy efektywności energetycznej strumieniowych układów chłodniczych dla nierozpatrywanych jak dotąd czynników roboczych;
- wyniki badań eksperymentalnych wymiany ciepła w procesie odparowania filmu cieczowego napływającego na poziomą rurę dla pentanu, heptanu i heksanu.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie w pełni oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały zrealizowane.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie techniki cieplnej – zwłaszcza w zakresie zagadnień chłodnictwa.

V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki oraz charakteru. W rozprawie doktorskiej zaproponowano konkretną konfigurację klimatyzatora strumieniowego o napędzie solarnym, które zostało skierowane do ochrony patentowej. Podjęto w rozprawie zagadnienia o kluczowym znaczeniu nie tylko z poznawczego punktu widzenia, lecz także aplikacyjnego, a w tym: zagadnienia minimalizacji napełnienia układu czynnikiem, rozwiązanie wymienników ciepła dedykowanych do zastosowania w analizowanym układzie w roli parownika i generatora pary.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki dotyczące wymiany ciepła w warunkach wrzenia w dużej objętości oraz przy odparowaniu filmów cieczowych mogą być w sposób bezpośredni zastosowane w praktyce inżynierskiej do obliczeń wymienników ciepła stosowanych w technice chłodniczej, technice pomp ciepła, energetyce cieplnej oraz w inżynierii chemicznej.

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. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny oraz eksperymentalny wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej.

1. W rozprawie często nie stosuje się terminologii powszechnie przyjętej. Przykładem najbardziej jaskrawym jest określenie przepływu krytycznego jako dławienia (w całej rozprawie) podczas gdy proces dławienia ma przypisane jednoznaczne znaczenie jako proces rozprężania bez wykonania pracy zewnętrznej. Można byłoby zatem w ostateczności określić żargonowo przepływ o wydatku krytycznym jako „zadławiony”, jakkolwiek w rozprawie należałoby oczekiwać stosowania terminologii powszechnie przyjętej w literaturze naukowej. Podobne zastrzeżenie budzi także pojęcie „ciśnienie wsteczne” (str. 14) zamiast „przeciwcisnienia” bądź „ciśnienia wylotowego”.
2. W Rozdziale 1, str. 9, Doktorant stwierdza, że: „Celem niniejszej pracy doktorskiej jest zwrócenie uwagi na zagadnienie doboru czynnika roboczego do strumieniowego systemu chłodniczego z napędem cieplnym, realizowanym za pomocą kolektorów słonecznych”. W moim przekonaniu tak sformułowany cel pracy nie w pełni koresponduje ze sformułowaniem celu pracy zawartym w Rozdziale 7, a przy tym można ocenić go jako zbyt skromny dla rozprawy doktorskiej.
3. Przy omawianiu zasady działania strumienicy nadkrytycznej w Rozdziale 2.1, str. 11, stwierdza się, że: „fala uderzeniowa przyjmuje postać struktury wielopęcherzykowej”. Nie jest jasne, jak należy rozumieć taką strukturę dla krytycznych przepływów gazów lub pary przegrzanej zachodzących w strumienicy.
4. Na str. 20 omawia się „sprawność” systemu strumieniowego – którą należałoby określić jako „efektywność energetyczną”.

5. Na str. 22 przy omawianiu prac innych autorów stwierdzono, że rozwiązanie „pozwała uzyskiwać wyższą temperaturę napędową, a co za tym idzie wyższą wydajność chłodniczą”. Nie ma jednakże jednoznacznego związku pomiędzy temperaturą napędową a wydajnością chłodniczą. Dalej, podaje się konkretne wymiary optymalnego położenia dyszy napędowej oraz długości komory mieszania, które to wielkości dotyczą jednostkowego przypadku i ich podawanie w rozprawie nie znajduje żadnego uzasadnienia.
6. W równaniu zachowania pędu (4.2), które posiada kluczowe znaczenie dla strumienic, pomija się człon związany z oddziaływaniem ciśnienia na powierzchnię kanału o zmiennym polu przekroju poprzecznego. Nie jest także jasny sens sumowania strumieni czynników w członach odpowiadających wylotowi ze strumienicy w równaniach (4.1) ÷ (4.3).
7. Nie jest jasny cel prezentacji równań gazodynamicznych (4.4) ÷ (4.9). Z równań tych się w pracy nie korzysta ani nie zostały one w żaden sposób skomentowane.
8. W wielu miejscach pracy stosuje się pojęcie „wydajność strumienicy” lub wydajność pracy”, które nie zostały w rozprawie zdefiniowane. Podobnie w wielu miejscach pracy stosuje się pojęcie „ciśnienie robocze” (np. Rys. 4.1) – należy się domyślać, że chodzi zapewne o ciśnienie pary na wlocie do dyszy napędowej.
9. Nie jest zrozumiałe, dlaczego w rozprawie w Rozdziale 4 podejmuje się zagadnienia związane z budową i działaniem strumienic dwufazowych cieczowo-parowych, które nie mają zasadniczo związku z przedmiotem rozprawy.
10. Jednym z najbardziej klasycznych modeli strumienicy parowej/gazowej jest model Hunaga i in. (1999), wykorzystywany przez Doktoranta w rozprawie. Nie jest zatem zrozumiałe, dlaczego model ten nie został w ogóle omówiony w części rozprawy prezentującej aktualny stan wiedzy, tj. w Rozdziale 4.
11. Jednym z kryteriów doboru czynnika roboczego podanych w Rozdziale 5, str. 32, jest „dobra współpraca z pompą kondensatu”. Kryterium to nie jest zrozumiałe, najprawdopodobniej chodzi tu o niską wartość jednostkowej pracy technicznej pompowania. Dalej wśród kryteriów wymienia się „brak kawitacji”, co nie jest zrozumiałe, bowiem na zjawisko to wpływ mają parametry pracy układu oraz rozwiązanie węzła skraplacz-pompa, nie zaś własności samego czynnika roboczego. Za zasadniczy problem eksploatacyjny wywołany obecnością kawitacji Doktorant uznał hałas, z czym trudno się zgodzić.
12. Przy omawianiu płynów mokrych na str. 32 Doktorant wskazał na zasadniczy według niego problem wywołany pojawieniem się przepływu dwufazowego, a mianowicie „zaburzenia przepływu wewnątrz kanałów strumienicy oraz możliwość ich uszkodzenia na drodze erozji”. W rzeczywistości pojawienie się przepływu dwufazowego wywołuje znacznie szersze konsekwencje, do czego w rozprawie się nie odniesiono.
13. W odniesieniu do sformułowanych wniosków na podstawie przeglądu literatury zawartych w Rozdziale 6, str. 38, należy stwierdzić, że część z nich zawiera stwierdzenia zbyt daleko idące: zatem nie jest prawdą, że brak jest publikacji traktujących o zastosowaniach nowych i naturalnych płynów roboczych w układach strumienicowych, a także, że prace dotyczące układów strumienicowych skupiały się dotychczas na obszarze niskich temperatur napędowych – jest bowiem raczej odwrotnie.
14. Na str. 33 rozprawy Doktorant stwierdza, że przy przegrzaniu pary napędowej „nadmiar dostarczanej w tym celu energii cieplnej znacząco obniża efektywność pracy urządzenia”. Stwierdzenie to nie jest oparte na jakiegokolwiek analizie, bowiem wraz z przegrzewem pary napędowej może wzrastać stosunek zasysania, a w efekcie także wydajność

- chłodnicza urządzenia, co może prowadzić zarówno do wzrostu, jak i spadku efektywności energetycznej.
15. W zakresie rozprawy zostało sformułowane zadanie nr 3, tj. „opracowanie modelu matematycznego strumienicy chłodniczej dla alternatywnych czynników chłodniczych”. Dalej, na str. 43 Doktorant stwierdza, że analizy teoretyczne w zakresie zastosowania czynników roboczych w układzie strumienicowym wykonał z zastosowaniem modelu Huanga i in. (1999) który został przez niego „dostosowany”. Nie przedstawiono jednakże w rozprawie w sposób jednoznaczny, na czym ma polegać modyfikacja modelu Hunaga i in. (1999) dokonana przez Doktoranta.
 16. W relacjach $(9.2) \div (9.6)$ zastosowano znaki równości w przybliżeniu nie komentując, na czym przybliżenie ma polegać. Ponadto należałoby oczekiwać listy definiujących wielkości, które traktowane są jako zmienne niezależne w analizowanym modelu.
 17. Na str. 46 Doktorant definiuje czynniki robocze „suche” z zastosowaniem wykresów prezentujących jedynie krzywe nasycenia w układzie współrzędnych ciśnienie-entalpia właściwa i stwierdza, że płyny są „suche”, gdy linia nasycenia „wygina się w prawo”. Jednakże definicję płynów „suchych” należy podać w oparciu o porównanie przebiegu krzywej nasycenia pary suchej nasyconej oraz izentrop, co jest w zgodzie ze stwierdzeniem podanym przez Doktoranta tylko dla wykresów w układzie współrzędnych temperatura-entropia właściwa.
 18. W analizie teoretycznej prezentowanej w Rozdziale 9 przyjęto założenie, że dla czynników „mokrych” przegrzanie pary napędowej jest tak dobrane, aby proces ekspansji w dyszy napędowej przebiegał w obszarze pary przegrzanej. W moim przekonaniu wyniki tak wykonanej analizy nie są w pełni jednoznaczne. Dla części analizowanych wyników przyjęto zatem wyższą temperaturę napędową, wobec czego tak uzyskane wyniki trudno porównywać w zakresie efektywności energetycznej oraz stosunku zasysania, które są wprost zależne od tego parametru. Dyskusyjnym jest także założenie, że porównanie dotyczy jednakowej średnicy gardła dyszy napędowej (przyjęto w rozprawie 1.0 mm). Za zdecydowanie bardziej racjonalne należałoby uznać wykonanie takiej analizy dla przyjętej jednakowej wydajności chłodniczej bądź alternatywnie jednakowej mocy cieplnej napędowej.
 19. Nie jest zrozumiałe, dlaczego w analizie nie uwzględniono nowych czynników roboczych syntetycznych, a w tym czynnika R-1234yf, który jest klasyfikowany jako palny, oraz czynnika R-1234ze(E), który jest klasyfikowany jako niepalny.
 20. W analizie teoretycznej nie wzięto pod uwagę obiegów nadkrytycznych dla analizowanego zakresu parametrów roboczych. Nie podano powodów tej decyzji.
 21. Na str. 59 Doktorant stwierdza, że czynnik R-123 wydaje się być lepszym wyborem z punktu widzenia COP_{th} . Jednakże zastosowanie tego czynnika roboczego jest od wielu lat prawnie zakazane w nowych układach chłodniczych.
 22. Nie jest zrozumiałe stwierdzenie Doktoranta zawarte na str. 59 rozprawy, że: „zbliżanie się do punktu krytycznego utrudnia realizację procesów zachodzących wewnątrz strumienicy”. W literaturze dostępne są publikacje wskazujące na efektywną pracę strumienicowego układu chłodniczego realizowanego w obiegu nadkrytycznym.
 23. Za dyskusyjny należałoby uznać pomysł wykonania oddzielnej analizy efektywności energetycznej opartej na ciepłe napędowym a oddzielnie opartej na mocy napędowej pompy. Biorąc pod uwagę stosunkowo bardzo mały (a w niektórych przypadkach wręcz pomijalny) udział mocy napędowej pompy w całkowitym bilansie energetycznym układu strumienicowego, wyniki analizy w tym zakresie nie mogą stanowić podstawy do racjonalnej oceny doboru czynnika roboczego.

24. W Rozdziale 10.2 dokonano przeglądu literatury w zakresie zależności do obliczania współczynników wnikania ciepła w procesie wrzenia objętości. Do analizy wzięto jednakże jedynie starsze, klasyczne zależności. Nie jest zrozumiałe, dlaczego wśród nich nie przeanalizowano szeroko stosowanej i mającej solidne podstawy fizyczne zależności zaproponowanej przez Roshenowa (1962). Dalej, stwierdzenie Doktoranta, że: „w literaturze światowej dotyczącej zagadnienia wrzenia brak jest jednak badań nad substancjami rozważanymi w niniejszej pracy” jest zbyt daleko idące, bowiem prace takie podejmowano (np. Gorenflo, 1993).
25. W zakresie oceny niepewności pomiarowych przedstawionej na str. 75 nie jest zrozumiałe, czy tor pomiarowy temperatury podlegał kalibracji, skoro przyjęto błąd pomiaru temperatury 0.2 K. Nie jest także zrozumiałe, skąd wynika zaproponowana zależność na błąd pomiaru mocy grzewczej P przedstawiona w Tabeli 10.1.
26. W zakresie badań współczynnika wnikania ciepła przy wrzeniu w objętości (Rozdział 10.3) nie przedstawiono w sposób klarowny, czy był jakikolwiek parametr utrzymywany na stałym poziomie (np. ciśnienie), co umożliwiłoby dokonywanie porównań uzyskanych wyników dla różnych czynników roboczych.
27. W Rozdziale 10.4 podjęto badania odparowania filmu cieczowego spływającego po powierzchni rury poziomej. Jednakże w rozprawie nie podjęto analizy stanu wiedzy w zakresie wcześniejszych licznych prac badawczych w zakresie wrzenia w takich warunkach oraz hydrodynamiki spływu odparowującego filmu cieczowego po pęku rur poziomych. Nie przeanalizowano istniejących licznych zależności opisujących to zjawisko, bardzo często w postaci zależności kryterialnych, umożliwiających ich aplikację dla badanych w niniejszej rozprawie czynników roboczych.
28. W Rozdziale 10.4 zaproponowano zależności opisujące wymianę ciepła w procesie odparowania filmu cieczowego napływającego na powierzchnię poziomej rury w postaci wzorów (10.37) ÷ (10.39). Jednakże należałoby oczekiwać jednej, wspólnej zależności kryterialnej, nie zaś oddzielnych zależności dla każdego z czynników z osobna. Najprawdopodobniej przyczyną, dla której Doktorantowi nie udało się dobrać stałych w proponowanym wzorze dla wszystkich badanych czynników jest to, że zaproponowana postać wzoru nie jest zależnością kryterialną, bowiem ostatni człon w tych wzorach jest członem wymiarowym: gęstość strumienia ciepła q . Nie jest zatem zrozumiałe, dlaczego nie zastosowano w tym przypadku którejs z liczb kryterialnych, np. liczby wrzenia Bo , co doprowadziłoby do uzyskania ogólnej zależności kryterialnej.
29. W Rozdziale 11, str. 104, ocenia się obniżenie efektywności energetycznej układu z dwoma obiegami pośredniczącymi w wymianie ciepła spowodowane zastosowaniem trzech pomp w takim rozwiązaniu. Jednakże nie bierze się pod uwagę bardziej znaczącego niekorzystnego dla efektywności energetycznej wpływu obniżenia temperatury pary napędowej oraz obniżenia temperatury nasycenia w parowniku. Ponadto, w rozprawie nie podjęto zagadnienia warunków chłodzenia skraplacza, co jest zwłaszcza istotne dla układów strumienicowych z uwagi na znaczący wpływ temperatury (i ciśnienia) skraplania na dostępny zakres pracy strumienicy.
30. W analizie prezentowanej w Rozdziale 11.1 przyjęto jako modelowy czynnik pentan. Nie uzasadniono jednakże wyboru tego właśnie a nie innego płynu roboczego. Nie jest także zrozumiałe, dlaczego przy ocenie napełnienia układu czynnikiem roboczym nie uwzględniono ilości czynnika w skraplaczu (str. 105).

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

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Praca pozbawiona jest zasadniczo błędów literowych w tekście. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- Na wielu rysunkach zastosowano opisy w języku angielskim. Ponieważ rozprawa jest napisana w języku polskim, zatem w całości powinien być konsekwentnie stosowany język polski.
- Oznaczenia sprawności η_p , η_s , oraz współczynnika prędkości φ_p (str. 19) nie zostały w rozprawie jednoznacznie zdefiniowane.
- W rozprawie można znaleźć niezręczności językowe, np. str. 28 „przepływ masowy płynu”; str. 65 „wrzenie cieczy cienkim filmem”, str. 92 „jakość filmu cieczowego”, str. 93 „rozwój profilu cieplnego”, str. 101, str. 113 „szybkość zmian współczynnika wnikania ciepła”.
- Na str. 50 omawiane są dopuszczalne poziomy stężenia dla wybranych rozpuszczalników organicznych, lecz nie podano, jakich czasów ekspozycji one dotyczą.
- Nie jest zrozumiałe, co oznacza w Tabeli 9.2 przypis odnoszący się do ciśnienia napędowego: „jeśli możliwe do uzyskania”. Ponadto brak jest w tej tabeli informacji o zastosowanych przegrzaniach dla czynników „mokrych”. Nie zamieszczono w tej tabeli wartości współczynników zasysania, wbrew informacji podanej na str. 53.
- W analizie prezentowanej w Rozdziale 9 nie podano informacji o przyjętej sprawności pompy.
- W pierwszym zdaniu Rozdziału 10.1 powinno być: „przejścia fazowego cieczy w parę”.
- Na str. 66 powinno być: „niestabilność Taylora” zamiast: „nierówność Taylora”.
- Na str. 68 brak jednostki masy cząsteczkowej [kg/kmol].
- Na str. 71, pierwsze zdanie w Rozdziale 10.3: wspomina się o wrzeniu w przepływie, podczas gdy prezentowane badania dotyczą wrzenia w objętości.
- Dane bibliograficzne pozycji [27] są niekompletne.

VII. Uwagi końcowe

Praca napisana jest w sposób zrozumiały, zamieszczono w niej wiele szczegółowych informacji pozwalających na dokładne 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 nad zagadnieniami analiz efektywności pracy układów strumieniowych. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

VIII. Wniosek do Rady Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych techniki cieplnej. Zastosowane przez

Doktoranta podejście w zakresie przeprowadzenia kompleksowej analizy efektywności energetycznej układów chłodniczych strumieniowych oraz badań eksperymentalnych wymiany ciepła w procesie wrzenia w objętości oraz odparowania filmu cieczowego uważam za właściwe. Praca stanowi w pełni oryginalny wkład do badań w zakresie chłodnictwa i wymiany ciepła. Wymaga szczególnego podkreślenia fakt opracowania analizy w sposób bardzo kompleksowy. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Gil 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: Budowa i eksploatacja maszyn.

Dorota Kozłowska