

Kraków, 21.05.2025

prof. dr hab. inż. Paweł Ocłoń
Katedra Energetyki,
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska

Recenzja pracy doktorskiej

Investigations of an ejector refrigeration system with flashing in the motive nozzle

Pana mgr inż. **Pawła Jakończuka**

Promotor: **dr hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. PB**

1. Zawartość rozprawy

Rozprawa doktorska składa się z dwóch głównych części. Pierwsza obejmuje przegląd literatury poświęcony dotychczasowym badaniom systemów ejektorowych. Druga dotyczy autorskich badań. Rozprawa została napisana w języku angielskim. Praca liczy 218 stron i składa się z 6 rozdziałów.

Doktorant we wprowadzeniu opisał w sposób ogólny zarys pracy i jego problem badawczy.

Postawił on następującą tezę naukową:

Systemy chłodnicze z ejektorem (ERS) wyposażone w dwufazowy ejektor z odprawowaniem rozprężnym w dyszy napędowej i wykorzystujące czynniki chłodnicze o niskim GWP stanowią energooszczędne i zgodne z wymogami środowiskowymi rozwiązania chłodzenia zasilane ciepłem.

Rozprawa bada zastosowanie i wykonalność takich systemów jako zrównoważonych technologii chłodniczych. Skupia się na makroskali – analizie wydajności, projektowania i funkcjonalności całego systemu jako spójnej jednostki.

Aby zrealizować postawioną tezę naukową Doktorant wyszczególnił następujące cele pracy:

1. Ocena wydajności cyklu ejektorowego z parą moką, ze szczególnym uwzględnieniem odparowania rozprężnego w dyszy napędowej.
2. Ocena działania dwufazowej dyszy przy procesie odparowania rozprężnego dla wybranych czynników low-GWP.

3. Ocena systemu chłodzenia zasilanego ciepłem z ejektorem napędzanym cieczą lub parą mokrą przy warunkach zapewniających przemianę fazową w dyszy

Zidentyfikowane luki badawcze we wprowadzeniu obejmują następujące obszary:

- a) Adaptację systemów ERS do źródeł ciepła niskotemperaturowych
- b) Zastosowanie modeli Henry'ego-Fauske'a oraz Modeli Równowagi Jednorodnej (HEM) w ejektorach z czynnikami low-GWP
- c) Analiza działania ejektorów z parą mokrą i przemianą fazową w dyszy
- d) Ocena czynników chłodniczych o niskim GWP w systemach ejektorowych

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozdział pierwszy przedstawia tło i motywację do podjęcia badań nad systemami chłodniczymi z ejektorem (ERS), w kontekście rosnących wymagań środowiskowych i potrzeby redukcji emisji gazów cieplarnianych. Szczególną uwagę poświęcono systemom wykorzystującym czynniki chłodnicze o niskim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego (low-GWP) oraz możliwość ich zastosowania w połączeniu z niskotemperaturowymi źródłami ciepła, np. odpadowymi lub słonecznymi. Wskazano główne luki badawcze w dziedzinie termodynamiki przepływu z przemianą fazową oraz modelowania i projektowania nowoczesnych ERS.

Rozdział drugi zawiera szczegółowe omówienie działania układu chłodniczego z ejektorem. Opisano jego podstawowe komponenty: parowacz, ejektor, skraplacz, pompa cieczy i zawór rozprężny. Przedstawiono różne konfiguracje układu, takie jak układy jednoejektorowe i wieloejektorowe, a także ich zastosowania w chłodnictwie, klimatyzacji i odzysku ciepła. Scharakteryzowano zjawiska termodynamiczne zachodzące w dyszy napędowej oraz określono kluczowe parametry wpływające na sprawność systemu.

Rozdział ten stanowi fundament do dalszych analiz modelowych, eksperymentalnych oraz oceny wpływu zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych na sprawność układów chłodniczych z ejektorem.

W rozdziale trzecim przedstawiono szeroki przegląd literatury dotyczącej współczesnych badań nad systemami chłodniczymi z ejektorem (ERS). Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom związanym z wykorzystaniem czynników chłodniczych o niskim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego (low-GWP), modelowaniem przepływów dwufazowych, a także stosowaniem zaawansowanych modeli obliczeniowych, takich jak model Henry'ego-Fauske'a oraz model równowagi jednorodnej (HEM). Omówiono również mechanizmy przemiany fazowej zachodzącej wewnątrz dyszy napędowej ejektora (tzw. *flashing*), a także metodykę i wyniki badań eksperymentalnych dostępnych w literaturze. Przedstawione analizy uwzględniają zarówno klasyczne konfiguracje układów, jak i ich modyfikacje z zastosowaniem wymienników ciepła, cykli hybrydowych oraz nowoczesnych koncepcji umożliwiających integrację ejektorów z układami kogeneracyjnymi i solarnymi.

Analiza dostępnych źródeł literaturowych wykazała istnienie istotnych luk badawczych, zwłaszcza w zakresie:

- a) walidacji modeli numerycznych dla warunków odbiegających od standardowych (np. niskie temperatury źródła ciepła, zmienne obciążenie cieplne),
- b) zastosowania czynników przyjaznych środowisku, dla których dane eksperymentalne są wciąż ograniczone,
- c) badań nad dynamiką *flashing flow* w rzeczywistych warunkach pracy oraz wpływem tego zjawiska na stabilność i sprawność układu.

Przeprowadzony przegląd literaturowy potwierdza zasadność podjętej tematyki badawczej oraz wskazuje na konieczność prowadzenia dalszych badań, szczególnie eksperymentalnych, w celu lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w strumienicowych układach chłodniczych oraz weryfikacji stosowanych modeli w kontekście współczesnych wyzwań klimatycznych i energetycznych.

Rozdział czwarty definiuje cele rozprawy oraz szczegółowy zakres badań. Główne cele to:

- a) analiza pracy ERS z parą moką i przemianą fazową w dyszy,
- b) walidacja modeli HF i HEM dla czynników low-GWP,
- c) eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk pracy układu.

Zdefiniowano również hipotezę badawczą i założenia doświadczalne, a także plan działania, łączący modelowanie teoretyczne i prace laboratoryjne.

W rozdziale piątym przeanalizowano szczegółowo zjawisko odparowania rozprężnego (ang. *flashing*) zachodzącego wewnątrz dyszy napędowej. Przedstawiono warunki termodynamiczne, które prowadzą do gwałtownej przemiany ciecz–para, oraz jej wpływ na efektywność układu. Oceniono różne scenariusze zasilania dyszy cieczą, moką parą oraz ich mieszaniną, badając wpływ parametrów wlotowych na spadek temperatury i charakterystyki przepływu. Dla każdego przypadku oceniono wpływ parametrów wlotowych (takich jak ciśnienie, temperatura, entalpia, stopień suchości) na charakterystyki przepływu, rozkład prędkości, intensywność odparowania oraz spadek temperatury wzdłuż długości dyszy. Wskazano, że obecność zjawiska *flashing* istotnie wpływa na zachowanie przepływu w dyszy napędowej, m.in. poprzez zwiększenie objętości przepływającego medium, generowanie kawitacji oraz modyfikację pozycji fali uderzeniowej w układzie. Potwierdzono że jest to kluczowy mechanizmu wpływającego na pracę ejektorów napędzanych czynnikiem w stanie ciekłym lub pary mokrej, co stanowi ważny kierunek dalszych badań eksperymentalnych i analiz numerycznych.

W rozdziale szóstym przedstawiono szczegółowy opis stanowiska badawczego opracowanego na potrzeby eksperymentalnej analizy systemu chłodniczego z ejektorem (ERS). Omówiono konfigurację układu oraz zastosowane komponenty, takie jak dysze, skraplacze, pompy obiegowe i zbiorniki. Przedstawiono również dobór i charakterystykę użytych czynników chłodniczych, ze szczególnym uwzględnieniem ich właściwości termodynamicznych. Szczególną uwagę poświęcono systemowi akwizycji danych, obejmującemu przepływomierze, czujniki ciśnienia i temperatury oraz urządzenia rejestrujące przebieg procesów w czasie

rzeczywistym. Opisano również procedury kalibracji zastosowanej aparatury pomiarowej, które obejmowały zarówno testy fabryczne, jak i kalibracje wtórne przeprowadzone przed rozpoczęciem pomiarów. Kalibracja uwzględniała m.in. charakterystyki nieliniowości, dryft temperaturowy oraz dokładność odczytów dla różnych zakresów mierzonych wielkości. Zgromadzony materiał oraz zastosowane rozwiązania techniczne umożliwiły przeprowadzenie serii badań eksperymentalnych, których celem jest szczegółowe określenie charakterystyk pracy układu ERS w zróżnicowanych warunkach pracy, w tym m.in. dla różnych temperatur parowania i skraplania, stopni suchości i wartości ciśnienia zasilania dyszy napędowej.

W rozdziale siódmym przedstawiono zastosowanie modelu równowagi jednorodnej (Homogeneous Equilibrium Model) do opisu przepływu w dyszy napędowej. Opisano równania bilansu masy, pędu i energii oraz założenia przyjęte w modelu (brak rozdziału faz, wspólna prędkość i temperatura cieczy i pary). Wyniki symulacji numerycznych uzyskane z zastosowaniem modelu HEM porównano z rezultatami badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym. Porównanie dotyczyło m.in. rozkładów ciśnienia, temperatury oraz lokalnej prędkości przepływu i jakości pary wzdłuż osi dyszy. Wyniki wykazały, że model HEM dobrze odwzorowuje ogólny charakter procesu odparowania rozprężnego oraz umożliwia identyfikację strefy inicjacji przemiany fazowej i lokalizacji fali uderzeniowej.

Zidentyfikowano jednak również ograniczenia modelu. W szczególności, przy bardzo szybkich zmianach ciśnienia i temperatury w obszarze przejścia ciecz–para, model może niedoszacowywać efektów relaksacyjnych oraz rozmycia czoła przemiany fazowej. Pomimo tych ograniczeń, model HEM okazał się przydatnym narzędziem do predykcji zachowania przepływu w dyszy napędowej, zwłaszcza w warunkach bliskich równowagi i przy zastosowaniu czynników chłodniczych z grupy HFO.

Rozdział ósmy skupia się na walidacji modelu Henry’ego-Fauske’a (HF), który jest często stosowany do analizy krytycznych przepływów dwufazowych. W oparciu o dane eksperymentalne określono graniczne warunki przepływu, współczynnik ekspansji, ciśnienie i temperaturę krytyczną oraz ich zgodność z modelem. Wyniki obliczeń wykonanych z zastosowaniem modelu HF porównano bezpośrednio z danymi eksperymentalnymi. W większości analizowanych przypadków model dobrze odwzorowywał rzeczywisty przebieg procesu krytycznego rozprężania, zarówno pod względem lokalizacji punktu krytycznego, jak i wartości maksymalnego przepływu masowego.

Wnioski z rozdziału wskazują, że model Henry’ego-Fauske’a, mimo swojego uproszczonego charakteru, stanowi efektywne narzędzie do analizy i wstępnego doboru parametrów przepływu w układach ERS. Jego integracja z bardziej zaawansowanymi modelami (np. CFD) lub empiryczna korekcja może dodatkowo zwiększyć jego użyteczność w zastosowaniach przemysłowych i badawczych.

Rozdział dziewiąty przedstawia wyniki eksperymentalnej analizy wydajności układu ERS pracującego z czynnikiem R1336mzz(Z). Zaprezentowano wartości stosunku zasysania, sprawności cieplnej oraz efektywności przy różnych warunkach wlotowych i ciśnieniowych. Wyniki badań wykazały, że R1336mzz(Z) może być skutecznie stosowany w układach ERS.

Uzyskane wartości COP mieściły się w zakresie 0,28–0,42 w zależności od temperatury generacji pary i ciśnienia skraplania. Wysoka stabilność termiczna oraz korzystne właściwości termofizyczne czynnika pozwoliły na uzyskanie stosunkowo wysokiego stosunku zasysania przy umiarkowanych ciśnieniach roboczych.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono analizę działania systemu ERS z czynnikiem R1234ze(E). Porównano jego właściwości i wydajność z innymi czynnikami, określono granice zastosowania oraz zidentyfikowano potencjalne ograniczenia (np. niska entalpia parowania, zależność od warunków otoczenia). Dane porównano w kontekście przyszłego zastosowania w układach chłodzenia solarnego i przemysłowego. Analiza wykazała, że R1234ze(E) pozwala osiągnąć COP w zakresie 0,25–0,38, jednak ze względu na niską entalpię parowania i dużą wrażliwość na warunki zewnętrzne, jego efektywność może być ograniczona w niskotemperaturowych układach. Ponadto, niska gęstość pary oraz klasyfikacja A2L wymagają większych przekrojów instalacji i zastosowania dodatkowych środków bezpieczeństwa.

Rozdział 11 stanowi podsumowanie najważniejszych wyników uzyskanych w ramach rozprawy. Szczególny nacisk położono na rolę przemiany fazowej zachodzącej wewnątrz dyszy napędowej ejektora, która okazała się kluczowym czynnikiem wpływającym na efektywność pracy systemu. Przeprowadzona analiza potwierdziła także przydatność modeli Henry’ego-Fauske’a (HF) oraz równowagi jednorodnej (HEM) w opisie przepływów z udziałem nowoczesnych czynników chłodniczych o niskim GWP. Wyniki te mają istotne znaczenie praktyczne — mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu oraz optymalizacji układów ERS pod kątem doboru geometrii dysz i parametrów pracy.

W zakończeniu wskazano również kierunki dalszych badań. Zaproponowano m.in. zastosowanie dysz o zmiennej geometrii, które pozwoliłyby na dostosowanie pracy systemu do zmiennych warunków pracy, oraz integrację z modelowaniem numerycznym CFD w celu uzyskania większej dokładności prognozowania zjawisk przepływowych. Zwrócono także uwagę na potrzebę poszerzenia bazy danych eksperymentalnych, obejmujących szerszy zakres czynników roboczych i warunków granicznych, co umożliwi dalszy rozwój technologii chłodniczych zgodnych z założeniami zrównoważonego rozwoju.

3. Uwagi merytoryczne i redakcyjne

1. Walidacja oraz zastosowanie modeli HEM (Homogeneous Equilibrium Model) i HF (Henry–Fauske) zostały przeprowadzone w sposób poprawny i spójny pod względem merytorycznym. Jednakże, w celu zwiększenia czytelności i przejrzystości uzyskanych wyników, zaleca się zaprezentowanie ich w formie zbiorczych tabel porównawczych. W takich zestawieniach powinny znaleźć się kluczowe parametry, takie jak: COP (współczynnik efektywności), stosunek zasysania (U), ciśnienie wylotowe z ejektora (p_{out}) oraz różnice pomiędzy modelami a wynikami badań eksperymentalnych.
2. W pracy analizowano dwa czynniki chłodnicze o niskim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego (low-GWP): R1234ze(E) oraz R1336mzz(Z). Warto uzupełnić uzasadnienie ich doboru, odnosząc się do kryteriów selekcji – takich jak właściwości termodynamiczne (np. entalpia parowania, ciśnienie, toksyczność, palność), dostępność rynkowa, zgodność z regulacjami, a także wcześniejsze doświadczenia badawcze lub

wyniki modelowania wstępnego. W szczególności, dobrze byłoby wskazać, dlaczego odrzucono inne czynniki chłodnicze nowej generacji.

3. Opisując część eksperymentalną, warto szerzej wyjaśnić, na jakiej podstawie dobrano geometrię dyszy napędowej – w szczególności jej długość, średnicę krytyczną, profil (np. stożkowy czy złożony) oraz kąt rozbieżności. Należy wskazać, czy geometria była oparta na danych literaturowych, wynikach modelowania CFD, analizach teoretycznych czy wcześniejszych badaniach wstępnych. Wyjaśnienie tej kwestii pozwoli lepiej ocenić trafność konstrukcji stanowiska badawczego i interpretację zjawiska *flashing*
4. Proszę o rozwinięcie kwestii aparatury pomiarowej (czujniki temperatury, ciśnienia, przepływu) i ich wpływu na niepewność wyznaczanych parametrów, takich jak COP, stosunek zasysania czy wydajność chłodnicza.
5. W pracy skoncentrowano się na aspektach termodynamicznych i eksperymentalnych, jednak brakuje odniesienia do potencjalnych kosztów wdrożenia układu ERS w warunkach przemysłowych lub dla zastosowania w budownictwie energooszczędnym. Warto byłoby rozważyć podstawowe kwestie techniczno-ekonomiczne: m.in. koszt komponentów (dysza, ejektor, pompy, wymienniki), skalowalność systemu, opłacalność inwestycyjna w porównaniu do innych technologii (np. absorpcyjnych lub sprężarkowych), a także możliwe ograniczenia eksploatacyjne.

4. Podsumowanie

Rozprawa doktorska wnosi istotny i oryginalny wkład do rozwoju wiedzy w obszarze strumieniowych układów chłodniczych (ERS), szczególnie w kontekście zastosowania niskotemperaturowych źródeł ciepła oraz czynników chłodniczych o niskim GWP. Praca wypełnia istotne luki badawcze poprzez połączenie modelowania, walidacji modeli i kompleksowych badań eksperymentalnych. W szczególności należy podkreślić: wykazanie efektywności pracy ERS z parą mokrą i zjawiskiem *flashing* w dyszy, zastosowanie i ocenę modeli HF i HEM dla nowoczesnych czynników chłodniczych, oraz rozszerzenie wiedzy o efektywności energetycznej i ograniczeniach czynników takich jak R1234ze(E) i R1336mzz(Z).

Zrealizowane zadania obejmowały zarówno zaawansowane modelowanie cykli (w tym dla czynników zeotropowych), jak i walidację modeli krytycznego przepływu na podstawie danych pomiarowych. Autor zaprojektował i zbudował stanowisko badawcze, a następnie przeprowadził szeroką kampanię eksperymentalną, uzyskując wartości charakterystyczne dla pracy ejektorów, takie jak stosunek zasysania, współczynnik sprężania oraz sprawność całkowita w różnych warunkach operacyjnych. Praca charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, metodyczną poprawnością i istotnym znaczeniem praktycznym dla projektowania nowoczesnych, niskoemisyjnych układów chłodzenia.

W pełni rekomenduję ocenianą rozprawę do publicznej obrony i wnioskuję do Rady Naukowej dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Białostockiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. W mojej ocenie Doktorant osiągnął wszystkie zaplanowane w rozprawie doktorskiej cele. Rozprawa spełnia również wymagania stawiane przez odpowiednie ustawy (Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn.

zm). Ponadto wnioskuję o wyróżnienie pracy, gdyż doktorant w swoim dorobku naukowym posiada artykuły w czasopismach z listy filadelfijskiej (łącznie siedem) takich jak m.in: International Journal of Refrigeration, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, Micromachines czy Archives of Thermodynamics.

Podpis jest prawidłowy

Dokument podpisany przez
Paweł Ocłoń
Data: 2025.05.21 17:33:07
CEST



