

Warszawa, dn. 06.06.2019 r.

mgr inż. Michał Sobieraj  
Doktorant

Politechnika Warszawska  
Wydział Instalacji Budowlanych,  
Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska  
Zakład Klimatyzacji i Ogrzewnictwa

### **Streszczenie rozprawy doktorskiej**

**pt: „Zastosowanie mieszanin z CO<sub>2</sub> jako czynników roboczych w podkrytycznym autokaskadowym obiegu chłodniczym”**

Rozprawa dotyczy badania możliwości zastosowania zeotropowej mieszaniny czynników roboczych, zawierającej CO<sub>2</sub>, w autokaskadowym obiegu chłodniczym. Rozwiązanie to umożliwia wykorzystanie naturalnego czynnika chłodniczego CO<sub>2</sub> w warunkach podkrytycznych. W ramach rozprawy zbudowano stanowisko badawcze. Przeprowadzono badania eksperymentalne i teoretyczne obiegu, z uwzględnieniem warunków wymiany ciepła w temperaturze poniżej punktu potrójnego dwutlenku węgla.

W ramach wstępu i przeglądu literatury przedmiotu, scharakteryzowano bieżącą sytuację w dziedzinie chłodnictwa. Określono ograniczenia prawne dotyczące stosowania substancji fluorowanych jako czynników roboczych. Przedstawiono kolejne etapy rozwoju branży chłodniczej, w kontekście poszukiwania czynników roboczych o jak najmniejszym wpływie na środowisko. Zauważono rosnącą popularność zastosowania dwutlenku węgla jako długoterminowego zamiennika syntetycznych czynników chłodniczych. Wymieniono zalety, wady i ograniczenia wynikające z wykorzystania CO<sub>2</sub> w obiegach chłodniczych. Wysoka temperatura punktu potrójnego ogranicza możliwość stosowania czystego CO<sub>2</sub> jako zamiennika substancji niskowrzących. Ze względu na niską temperaturę krytyczną, dwutlenek węgla stosowany jest głównie w układach transkrytycznych i kaskadowych. W ostatnich latach nastąpił także wzrost zainteresowania wykorzystaniem układów autokaskadowych, przy czym liczba publikacji dotyczących zastosowania CO<sub>2</sub> w tych układach jest ograniczona. Na podstawie dostępnych opisów zastrzeżeń patentowych wyjaśniono zasadę działania układów autokaskadowych. Zdaniem autora niniejszej rozprawy, układy te mogą stanowić rozwiązanie dla ograniczeń technicznych związanych ze stosowaniem dwutlenku węgla.

Wnioski płynące z wykonanego przeglądu literatury były podstawą do sformułowania tezy, celu i zakresu niniejszej rozprawy doktorskiej, przedstawionych w rozdziale trzecim.

Podstawą działania układów autokaskadowych jest zastosowanie zeotropowej mieszaniny czynników roboczych, o odpowiednio dobranym składzie. W rozdziale czwartym przedstawiono teoretyczne rozważania dotyczące wyboru składnika wysokowrzącego. Rozpatrzono kwestie związane z efektywnością rozdziału frakcji ciekłej i parowej w separatorze fazy. Przedstawiono wpływ zawartości masowej  $\text{CO}_2$  na zmianę temperatury czynnika w procesie odparowania. Przeprowadzono także analizę wpływu czynnika wysokowrzącego na palność potencjalnej mieszaniny. Zaproponowano zastosowanie izobutanu R600a jako składnika wysokowrzącego, tworzącego mieszaninę zeotropową z dwutlenkiem węgla (R744).

W rozdziale piątym przedstawiono koncepcję stanowiska badawczego, z uwzględnieniem opisu przemian czynnika w obiegu, bilansu cieplnego i doboru komponentów. Scharakteryzowano układ pomiarowy. Opisano główne elementy służące do regulacji parametrów pracy obiegu, w tym sposób utrzymania parametrów skraplania i nastawiania stopnia otwarcia elektronicznych zaworów rozprężnych.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych układu autokaskadowego pracującego z zeotropową mieszaniną, zawierającą  $\text{CO}_2$ . Zaproponowana mieszanina została po raz pierwszy zastosowana w układzie autokaskadowym. W celu poznania działania układu, konieczne było przeprowadzenie szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych. Eksperymenty rozpoczęto od określenia właściwego stopnia napełniania układu czynnikiem roboczym. Następnie sprawdzono wpływ temperatury skraplania na parametry pracy obiegu. Określono także jakie efekty przynosi zastosowanie wymiennika regeneracyjnego. Przeprowadzono szereg prób zmierzających do określenia wpływu zmiany stopnia otwarcia zaworów rozprężnych. Zbadano wpływ zmiany obciążenia cieplnego parownika. W celu porównania z dostępnymi w literaturze wynikami badań, sprawdzono działanie obiegu z zastosowaniem R134a, jako czynnika wysokowrzącego. Analiza działania obiegu autokaskadowego uwzględniała badanie rozkładu temperatury w wewnętrznych wymiennikach układu.

Przeprowadzone eksperymenty były podstawą do opracowania modelu obliczeniowego układu autokaskadowego, przedstawionego w rozdziale siódmym. Program obliczeniowy umożliwia wyznaczenie parametrów obiegu na podstawie wprowadzonych danych wejściowych. Przeprowadzono weryfikację modelu z wykorzystaniem danych z eksperymentów.

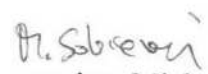
Opracowany model obliczeniowy został zastosowany do wykonania analizy egzergetycznej obiegu autokaskadowego. Wskazano elementy układu, w których występuje znaczna strata potencjału termodynamicznego czynnika roboczego. Określono wpływ zastosowanego czynnika wysokowrzącego na straty egzergii w układzie. Obliczenia prowadzono równoległe z analizą rozkładu temperatury w wymiennikach wewnętrznych. W celu oceny zasadności stosowania układu autokaskadowego, porównano uzyskane wyniki z danymi literaturowymi.

Rozdział dziewiąty rozprawy dotyczy badania współczynnika przejmowania ciepła przy przepływie roztworu stałego CO<sub>2</sub> w rurze wymiennika ciepła. Określono charakter przepływu w zależności od stopnia nasycenia roztworu. Wskazano sposób obliczania udziału molowego stałego CO<sub>2</sub> w warunkach krystalizacji. Wykazano, że zaburzenie przepływu, wynikające z krystalizacji nadmiaru stałego CO<sub>2</sub> z roztworu, powoduje poprawę warunków wymiany ciepła na drodze przejmowania. Zbadano wpływ gęstości strumienia ciepła, stopnia suchości pary i udziału molowego stałego CO<sub>2</sub> na uzyskiwaną wartość współczynnika przejmowania ciepła. Zaproponowano korelację empiryczną, pozwalającą na wyznaczenie wartości współczynnika przejmowania ciepła w warunkach krystalizacji.

W rozdziale dziesiątym przedstawiono wnioski z przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych układu autokaskadowego. Stwierdzono, że zastosowanie układu autokaskadowego umożliwi realizację obiegu chłodniczego z wykorzystaniem CO<sub>2</sub> w warunkach podkrytycznych. Układ autokaskadowy pracujący z mieszaniną zeotropową, zawierającą dwutlenek węgla i izobutan, może być rozważany jako rozwiązanie alternatywne dla stosowanych obecnie czynników syntetycznych, charakteryzujących się wysoką wartością GWP.

W jedenastym rozdziale pracy określono możliwy kierunek dalszych prac związanych z zastosowaniem mieszanin zeotropowych z CO<sub>2</sub> w układach chłodniczych.

**Słowa kluczowe:** dwutlenek węgla, izobutan, mieszanina zeotropowa, naturalne czynniki chłodnicze, przejmowanie ciepła, sublimacja

  
mgr inż. Michał Sobieraj