

# Streszczenie rozszerzone

## Wstęp

Wzrost cen energii oraz zaostrzające się przepisy związane z ochroną środowiska zmuszają przemysł do poszukiwania nowych rozwiązań, które pozwolą na bardziej efektywne zarządzanie energią, w szczególności energią odpadową. Wiele procesów technologicznych generuje znaczne ilości ciepła odpadowego, które nie jest w pełni wykorzystywane. Ciepło to może stanowić cenny zasób energetyczny, jeśli zostanie odpowiednio zagospodarowane. Istnieje wiele obszarów, w których ciepło odpadowe ma postać niskotemperaturową, poniżej 85°C. Jednym z procesów generującym duże ilości niskotemperaturowego ciepła odpadowego jest sprężanie powietrza, podczas którego, prawie cała energia elektryczna dostarczana do sprężarki jest zamieniana na ciepło, z czego większość to niskotemperaturowe ciepło odbierane przez układ chłodzenia oleju. Ze względu na jego parametry niskotemperaturowe, jego możliwe wykorzystanie jest bardzo ograniczone. W zależności od potrzeb może być ono wykorzystywane zarówno pasywnie do produkcji ciepłej wody lub ogrzewania, jak i aktywnie do produkcji ciepła o wyższych parametrach, energii elektrycznej lub wydajności chłodniczej.

Jednym z innowacyjnych rozwiązań, które może sprostać tym wyzwaniom, są strumienicowe układy chłodnicze. W zakładach przemysłowych dysponujących ciepłem odpadowym, układy te, wykorzystując bezpieczne dla środowiska czynniki chłodnicze, mogą efektywnie przekształcać niskotemperaturowe ciepło odpadowe w wydajność chłodniczą, oferując alternatywę dla konwencjonalnych systemów chłodzenia opartych na sprężarkach mechanicznych. Strumienicowe układy chłodnicze charakteryzują się prostą konstrukcją oraz niskimi kosztami utrzymania i konserwacji, co czyni je atrakcyjnym rozwiązaniem dla przemysłu.

Pomimo licznych opisów w literaturze, takie systemy nie znalazły do tej pory zastosowań przemysłowych. W celu wdrożenia tej technologii w przemyśle potrzebne jest wykonanie wielu badań implementacyjnych, w tym obejmujących pracę strumienicowych urządzeń chłodniczych w rzeczywistych warunkach zasilania przemysłowym ciepłem odpadowym.

## Motywacja i cele

Przedstawiony w rozprawie doktorskiej przegląd literatury pokazał, że brakuje w niej dobrze opisanych modeli systemowych układów chłodniczych opartych na strumieniach, obejmujących wszystkie komponenty i umożliwiające wybór każdego elementu osobno. Publikacje badawcze koncentrują się głównie na modelowaniu samej strumienicy naddźwiękowej, prezentując wiele modeli 0-D i 1-D opisujących strumienice jednofazowe. Są one zdominowane przede wszystkim przez modele zwalidowane na podstawie eksperymentów przeprowadzonych na wycofywanych już czynnikach chłodniczych, głównie z grupy hydrofluorowęglowodorów. W badaniach eksperymentalnych opisanych w literaturze brakuje również nie uwzględniają one niskociśnieniowych czynników chłodniczych w warunkach niskotemperaturowego odzysku ciepła odpadowego. Co więcej, znaczna część prac nad strumienicowymi układami chłodniczymi dla nowych, przyjaznych dla środowiska grup czynników chłodniczych obejmuje prace przeprowadzone dla warunków dostarczania ciepła odpadowego o temperaturach wyższych niż 100°C. Obejmują one niewielką liczbę przypadków prac eksperymentalnych, laboratoryjnych i wiele prac teoretycznych opartych na modelach skalibrowanych dla wycofanych czynników chłodniczych. Obecnie na całym świecie brakuje komercyjnych systemów chłodniczych opartych na strumienicach napędzanych ciepłem odpadowym niskiej jakości, a zatem ciężko znaleźć również informację o testach ww. układów chłodniczych w warunkach rzeczywistego obciążenia.

Wszystkie opracowane modele teoretyczne strumienic naddźwiękowych wymagają zestawu sprawności komponentów strumienicy, które są oparte na danych eksperymentalnych. Mimo, że te sprawności komponentów zostały dobrze opracowane dla konwencjonalnych płynów roboczych, nadal istnieje luka w wiedzy na temat dostępnych poziomów powyższych sprawności dla nowej generacji płynów roboczych. Powyższe można uznać za dodatkową motywację do przeprowadzenia testów eksperymentalnych.

Na podstawie przedstawionego w we wstępie teoretycznym rozprawy doktorskiej stanu wiedzy zidentyfikowano następujące innowacje i nowości, które będą stanowić podstawę niniejszej rozprawy:

- opracowanie pierwszych strumienicowych systemów chłodniczych napędzanych ciepłem odpadowym niskiej jakości o temperaturze 85°C i niższej, na pełną skalę przemysłową,
- zastosowanie nowej generacji płynów roboczych zasilanych ciepłem napędowym niskiej jakości,
- opracowanie kompleksowej procedury projektowej dla całego strumienicowego układu chłodniczego, która zostanie zweryfikowana w pełnej skali przemysłowej,
- potrzebę rozpoznania wydajności komponentów strumienicy naddźwiękowej dla nowej generacji płynu roboczego.

Z tego powodu niniejsza praca miała na celu opracowanie szybko działającego modelu doboru komponentów do strumienicowego układu chłodniczego wraz z walidacją eksperymentalną dla pierwszych prototypów strumienicowego układu chłodniczego firmy MARANI Ltd. pracującego z niepalnymi czynnikami chłodniczymi R1233zd(E) i R1234ze(E) napędzanych ciepłem odpadowym o bardzo niskiej jakości. W szczególności sformułowano następujące cele cząstkowe:

- sformułowanie modelu matematycznego dla doboru komponentów strumienicowego układu chłodniczego napędzanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z wykonującym szybkie obliczenia zerowymiarowym modelem strumienicy,
- przeprowadzenie testów dwóch pierwszych prototypów strumienicowych układów chłodniczych napędzanych ciepłem odpadowym o mocy cieplnej 200 kW i 600 kW w rzeczywistych warunkach przemysłowych z wykorzystaniem nowych, przyjaznych dla środowiska i niskociśnieniowych czynników chłodniczych HFO,
- walidacja i kalibracja modeli komponentów strumienicowego obiegu chłodniczego w oparciu o wyniki eksperymentu,
- eksperymentalne porównanie dwóch typów czynników chłodniczych, R1233zd(E) i R1234ze(E), w zastosowaniu zarówno w urządzeniach chłodniczych do standardowych temperatur wody logowej jak i do podwyższonych temperatur wody logowej przeznaczonych do wysokotemperaturowych systemów klimatyzacyjnych.

## **Struktura rozprawy**

Realizacja głównych celów przedmiotowej rozprawy doktorskiej jest wspierana poprzez zastosowanie następującego porządku oraz układu logicznego jej treści. Praca została podzielona na sześć głównych rozdziałów, z których każdy porusza różne aspekty zagadnienia, od wprowadzenia teoretycznego po szczegółową analizę eksperymentalną.

Pierwszy rozdział dostarcza niezbędnych podstaw teoretycznych, wprowadzając czytelnika w problematykę ciepła odpadowego oraz technologii strumienicowych układów chłodniczych. Rozdział ten stanowi tło teoretyczne rozprawy, przedstawiając problem ciepła odpadowego w przemyśle oraz możliwości jego wykorzystania. Zawiera także przegląd literatury dotyczącej strumienicowych układów chłodniczych oraz innych technologii opartych na wykorzystaniu ciepła odpadowego. W tej części rozprawy przedstawiono również główne cele badawcze oraz motywacje do podjęcia tematu, wskazując na rosnące zainteresowanie technologiami chłodniczymi napędzanymi ciepłem odpadowym, w szczególności w kontekście przemysłowym.

W rozdziale drugim skoncentrowano się na opisie badanych systemów chłodniczych. Szczegółowo omówiono dwa prototypowe systemy chłodnicze: MARANI CHILLER 200 oraz MARANI CHILLER 600. Systemy te zostały zaprojektowane w taki sposób, aby wykorzystywać ciepło odpadowe o temperaturze nieprzekraczającej 85°C do napędzania układu chłodniczego. Rozdział ten szczegółowo opisuje konstrukcję

wymienionych systemów, ich komponenty, w tym strumienice, wymienniki ciepła oraz zawory rozprężne, a także wyzwania technologiczne związane z ich budową i eksploatacją. W przedmiotowej części rozprawy przedstawiono również parametry operacyjne systemów chłodniczych oraz oczekiwane rezultaty pracy w różnych trybach chłodzenia.

Trzeci rozdział rozprawy zawiera szczegółowy opis stanowisk badawczych, na których przeprowadzono testy eksperymentalne prototypowych systemów chłodniczych. Przedstawiono schematy układów chłodniczych z zaznaczonymi punktami pomiarowymi, a także opisano zastosowane metody pomiarowe, takie jak pomiar temperatury, ciśnienia oraz przepływu czynnika chłodniczego. W rozdziale tym opisano również procedury eksperymentalne oraz modyfikacje wprowadzone podczas testów w celu zwiększenia wydajności systemów.

Kolejna część przedstawia model matematyczny komponentów systemu. Zaprezentowano w niej matematyczny model strumienicowego układu chłodniczego, który umożliwia precyzyjne obliczenia dotyczące doboru komponentów systemu. Model ten został opracowany z uwzględnieniem specyfiki poszczególnych elementów układu, takich jak strumienica, wymienniki ciepła, pompa, czy zawór rozprężny. Opisano również założenia modelu oraz strategię jego rozwiązania.

Piąty rozdział rozprawy poświęcony został przedstawieniu wyników testów eksperymentalnych przeprowadzonych na prototypowych systemach chłodniczych. Omówiono w nim weryfikację modelu matematycznego oraz przedstawiono porównanie wyników dla systemów pracujących z różnymi czynnikami chłodniczymi. Szczególną uwagę zwrócono na analizę wpływu parametrów operacyjnych, takich jak temperatura i ciśnienie, na wydajność systemów oraz współczynnik COP. W rozdziale tym przedstawiono również wyniki porównawcze dla czynników R1233zd(E) oraz R1234ze(E) i oceniono ich efektywność w różnych trybach chłodzenia.

Ostatnia część rozprawy zawiera podsumowanie najważniejszych wyników badań oraz ocenę realizacji założonych celów. Przedstawiono w niej wnioski dotyczące efektywności strumienicowych układów chłodniczych oraz możliwości ich dalszego rozwoju. Zwrócono również uwagę na potencjalne kierunki dalszych badań, w szczególności te związane z optymalizacją komponentów systemu oraz testowaniem nowych czynników chłodniczych.

## **Przedmiot rozprawy**

Przedmiotem pracy dyplomowej były dwa innowacyjne i wyprodukowane po raz pierwszy prototypy strumienicowych układów chłodniczych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym o mocy 200 kW i 600 kW odzyskiwanym z procesów przemysłowych, w tym z systemów sprężania powietrza. Zarządzanie znacznymi ilościami ciepła generowanego przez te systemy stanowi poważne wyzwanie techniczne, ponieważ jest to w przeważającej mierze ciepło niskotemperaturowe o temperaturze 85°C, a w wyjątkowych przypadkach nawet poniżej 70°C. Z powodów wynikających

ze zmniejszenia efektywności energetycznej związanej z przekształcaniem tego ciepła w energię elektryczną, racjonalnym działaniem jest zagospodarowanie tego ciepła do celów innych niż produkcja energii elektrycznej.

Prototypowe strumienicowe układy chłodnicze reprezentują innowacyjną technologię konwersji ciepła niskiej jakości na moc chłodniczą, która może być wykorzystywana zarówno do chłodzenia procesowego, jak i klimatyzacji obiektów przemysłowych. Są one zaprojektowane do pracy w dwóch trybach chłodzenia. W wersji konwencjonalnej, nazwanej na potrzeby tej pracy, standardowe parametry, w których wymagane jest uzyskanie temperatury wody lodowej 6°C, co umożliwia ich zastosowanie w urządzeniach klimatyzacyjnych. W przypadku nowych rozwiązań w klimatyzacji pomieszczeń, w tym przemysłowych, mogą one również pracować w trybie chłodzenia wysokotemperaturowego, wymagającego temperatury 16°C. Ze względu na niskie temperatury ciepła odpadowego niemożliwe jest zastosowanie znanych technologii układów sorpcyjnych. Jedną z najmłodszych technologii systemów chłodniczych tj. układy strumienicowe, zostały opracowane, przetestowane i wdrożone po raz pierwszy. Układy chłodnicze składały się z obiegu czynnika chłodniczego i obiegów pośredniczących wymianie ciepła, tj. pętli gorącej wody, do transportu ciepła odpadowego do napędu układu chłodniczego, pętli roztworu glikolu w wodzie do transportu mocy chłodniczej oraz pętli wody chłodzącej skraplacza. Prototypowe układy chłodnicze składały się z płytowych wymienników ciepła, tj. generatora i podgrzewacza, do odbioru ciepła odpadowego, parownika do odbioru ciepła z chłodzonego płynu, skraplacza do oddawania ciepła do otoczenia oraz rekuperatora do odzyskiwania części przegrzania odprowadzanej pary w celu wstępnego podgrzania ciekłego czynnika chłodniczego.

Prototypowe układy chłodnicze zostały przygotowane do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Układ chłodniczy zasilany w warunkach nominalnych strumieniem ciepła 200 kW (MARANI CHILLER 200) został zaimplementowany w sprężarkowni MARANI i zasilane ciepłem odpadowym z układu olejowego 3 sprężarek powietrza o mocy napędu elektrycznego 200 kW każda. Układ został opomiarowany przy użyciu rezystancyjnych czujników temperatury, przetworników ciśnienia oraz przepływomierzy masowych do pomiaru strumieni masy czynnika chłodniczego i przepływomierzy elektromagnetycznych do pomiarów w pętlach pośredniczących.

Drugim testowanym systemem chłodniczym był prototypowy układ chłodniczy zasilany nominalnie ciepłem odpadowym 600 kW (MARANI CHILLER 600). Ze względu na trudności z zapewnieniem przemysłowej lokalizacji do testów, urządzenie zostało zainstalowane na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym na Politechnice Białostockiej. Powyższe stanowisko testowe składało się z kontenerowej wytwornicy pary o dostępnej mocy cieplnej 1,2 MW oraz wieży chłodniczej o podobnej wydajności cieplnej. Instalacja pozwalała na płynną regulację mocy od około 300 kW do mocy maksymalnej. Dostarczała maksymalnie 1500 kg/h pary o jakości co najmniej 0,97. W celu zasilenia prototypowego układu chłodniczego zmodyfikowano układ parowy i wyposażono go w zawór regulacyjny do sterowania natężeniem przepływu pary kierowanej do wymienników ciepła, symulując transport odzyskanego ciepła

odpadowego. Ponadto wykonano układ wytwornicy pary, aby umożliwić sztuczne obciążenie parownika przez dodatkową pętlę z płytowym wymiennikiem ciepła, w którym również kontrolowano natężenie przepływu pary.

## **Model matematyczny**

Opracowano model iteracyjny do analizy termodynamicznej strumienicowego układu chłodniczego, koncentrując się w szczególności na projektowaniu agregatów chłodniczych o różnych wydajnościach i różnych konfiguracjach w oparciu o dwa testowane układy chłodnicze. Model ten, zbudowany z modeli poszczególnych komponentów, zawiera algorytm matematyczny, który obejmuje modele standardowych komponentów układu chłodniczego, tj. zaworu rozprężnego, parownika i skraplacza oraz niestandardowych urządzeń, tj. strumienicy naddźwiękowej, pompy obiegowej i generatora. Model systemu obejmuje również symulację dodatkowego wymiennika ciepła - rekuperatora oraz możliwość modelowania separacji wymienników ciepła służących do odbioru ciepła odpadowego na generator i podgrzewacz. Oprogramowanie może oszacować kluczowe parametry wydajności systemów chłodniczych, takie jak wskaźnik wydajności energetycznej (COP), wydajność chłodniczą czy zapotrzebowanie na energię elektryczną. Przewiduje również krytyczne wymiary i parametry wydajnościowe strumienicy oraz wymienników ciepła.

Najważniejszą częścią modelowania układu chłodniczego opartego na strumienicach, jest bez wątpienia odpowiednie oszacowanie wydajności strumienicy oraz parametrów wylotowych przy minimalnych kosztach obliczeniowych w celu optymalizacji systemu w wielu warunkach pracy i wariantach zakresu mocy. W celu obliczeń geometrii oraz wydajności strumienicy zbudowano zerowymiarowy model w oparciu o dostępne informacje literaturowe oraz stosując własne usprawnienia obliczeniowe. Model daje możliwość obliczenia geometrii strumienicy w narzędziu do doboru komponentów lub obliczeń wydajności strumienicy w oparciu o podane wartości brzegowe. Model został szczegółowo opisany w nieniejszej rozprawie doktorskiej.

W obliczeniach wymienników ciepła zastosowano dwa podejścia. Uproszczone obliczenia wykorzystujące równania zachowania energii były stosowane w celu dostosowania ciśnienia nasycenia w generatorze, parowniku i skraplaczu w celu przyspieszenia wykonywania obliczeń. Modele logarytmicznej średniej różnicy temperatur dla płytowych wymienników ciepła oparte literaturze zostały wykorzystane do obliczenia wydajności wymiennika ciepła. Miały one możliwość zastosowania w dwóch trybach: projektowania wymiennika ciepła i analizy wymiennika ciepła. W tym pierwszym trybie modele te zostały wykorzystane do przewidywania całkowitej powierzchni wymiany ciepła, a tym samym liczby płyt wymiennika ciepła. W drugim przypadku przypadku modele LMTD zostały wykorzystane do obliczenia parametrów na wylotach wymiennika ciepła i oszacowania spadków ciśnienia.

## **Badania eksperymentalne i kluczowe wyniki**

Przeprowadzono pięć zasadniczych kampanii pomiarowych w warunkach przemysłowych dla dwóch prototypowych układów chłodniczych. W ramach pierwszej kampanii pomiarowej zbadano prototyp MARANI CHILLER 200 w w wersji podstawowej w warunkach projektowych i pozaprojektowych. Ciepło odpadowe wykorzystywane do zasilania układu chłodniczego pochodziło z układu olejowego sprężarek powietrza, a testowanym czynnikiem chłodniczym był R1233zd(E). Pomiary wykonano dla wariantu chłodzenia wysokotemperaturowego, tj. temperaturze parowania około 11°C. Układ chłodniczy został przetestowany w dwóch sesjach pomiarowych, przy zasilaniu ciepłem odpadowym 150 kW oraz 170 kW oraz temperaturze gorącej wody w zakresie temperatury ciepłej wody w zakresie od 60°C do 63°C. Uzyskano w zasadniczo wysoką wydajność układu strumienicowego jak na warunki zasilania ultra-nisko temperaturowym ciepłem odpadowym, gdzie COP układów w warunkach projektowych wynosiło nawet 0.16.

Drugą kampanię pomiarową przeprowadzono po zmodyfikowaniu systemu grzewczego i wymianie strumienicy. Układ chłodniczy pracował w warunkach projektowych z dostarczaniem strumieniem ciepła odpadowego 200 kW i temperaturą gorącej wody około 70°C. Układ chłodniczy został ponownie przetestowany w warunkach chłodzenia wysokotemperaturowego. Osiągnął on COP na poziomie 0.25, co było zakładanym rezultatem w projekcie. Jednak nie było możliwości wykonania testów w tzw. standardowych warunkach chłodzenia. Jako przyczynę wskazano straty ciśnienia za strumienicą.

Ostatnią kampanią pomiarową dla układu chłodniczego MARANI CHILLER 200, przeprowadzono po zmodyfikowaniu układu chłodniczego do pracy bez wymiennika rekuperacyjnego za strumienicą w celu ograniczenia strat ciśnienia. W tej kampanii pomiarowej wykonano serie pomiarów dla chłodzenia standardowego i wysokotemperaturowego przy zmiennych temperaturach skraplania, ponownie uzyskując charakterystykę roboczą układu chłodniczego. Warunki zasilania pozostały niezmiennicze. Ograniczenie strat ciśnienia w układzie chłodniczym znacząco poprawiło wydajność pracy strumienicy. Istniała możliwość przeprowadzenia testów zarówno w warunkach standardowych, jak i warunkach chłodzenia wysokotemperaturowego. Dla chłodzenia standardowego uzyskano COP na poziomie 0.13.

W przypadku prototypu MARANI CHILLER 600, po uruchomieniu systemu napędzanego parą wodną i rozwiązaniu problemów z rozruchem, przeprowadzono test układu strumienicowego, z wykorzystaniem R1233zd(E) jako czynnika roboczego. Ze względu na kłopotliwą regulację układu parowego pod względem wymaganych parametrów pracy, zarejestrowano punkty pomiarowe przy zmiennych parametrach pracy. Wykonano pomiary w warunkach chłodzenia standardowego uzyskując COP na poziomie nawet 0.29. Parametry pracy nie odpowiadały jednak warunkom wcześniejszych pomiarów na mniejszym stanowisku badawczym, z uwagi na wysokie wartości przegrzewu pary czynnika chłodniczego opuszczającej generator.

W ostatniej kampanii pomiarowej układ grzewczy został zmodyfikowany w celu

ograniczenia przegrzewu pary. Z uwagi na wcześniejsze doświadczenia projektowe zbadano czynnik R1234ze(E), będący czynnikiem wysokociśnieniowym. Uzyskano dobre rezultaty badań. Układ chłodniczy osiągnął COP 0.25 dla chłodzenia standardowego.

Wykorzystując wyniki pomiarów został zwalidowany model strumienicy oraz modele płytowych wymienników ciepła. Osiągnięto satysfakcjonujące rezultaty dokładności obliczeń zakładanych parametrów, tj. stosunek eżekcji strumienicy, spręż strumienicy oraz sprawność strumienicy a dobrą dokładność estymacji temperatur wylotowych z wymienników ciepła.

## **Podsumowanie i wnioski**

Praca doktorska przedstawia dogłębne badania nad opracowaniem aplikacji do doboru komponentów dla strumienicowych systemów chłodniczych zasilanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych. Badanie obejmowało stworzenie modelu matematycznego, testowanie prototypowych jednostek chłodniczych oraz porównawczą analizę eksperymentalną różnych czynników chłodniczych.

Opracowano model strumienicowego układu chłodniczego z jednofazowym modelem strumienicy naddźwiękowej i płytowych wymienników ciepła, który został zweryfikowany przez pomiary eksperymentalne pierwszych prototypów strumienicowego układu chłodniczego w skali przemysłowej i napędzanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym o mocy 200 kW i 600 kW. Powyższe prototypy wykorzystywały nowy, przyjazny dla środowiska płyn roboczy z grupy HFO, R1233zd(E), znany z niskich poziomów ciśnienia w testowanych zakresach temperatur. Zastosowano konfigurację strumienicowego układu chłodniczego z rekuperatorem do częściowego odzysku ciepła za strumienicą. Fizyczne rozdzielanie wymiennika odzysku ciepła odpadowego na sekcję podgrzewania wstępnego w podgrzewaczu wstępnym oraz sekcję odparowywania i przegrzewania czynnika chłodniczego w generatorze było innowacyjną konstrukcją. Zastosowano duże rozmiary strumienic jak dla tego typu układu chłodniczego, a układ chłodniczy napędzany 600 kW ciepła odpadowego wykorzystywał system trzech strumienic pracujących równolegle. Wyniki eksperymentalne uzyskane z tych prototypów dostarczyły cennych danych do walidacji modelu matematycznego i wykazania praktycznej wykonalności proponowanej technologii.

Opracowano kompleksowy model matematyczny do szybkiego doboru komponentów dla strumienicowych układów chłodniczych. Wyniki modelu najistotniejszego urządzenia układu chłodniczego, tj. strumienicy naddźwiękowej, zostały wstępnie zweryfikowane w oparciu o dostępne w literaturze wyniki eksperymentalne dla wycofywanych czynników chłodniczych, osiągając wysoką dokładność oszacowania wskaźnika eżekcji w projektowym i poza-projektowym obszarze pracy. Uzyskano błąd względny poniżej 10% dla skalibrowanych sprawności komponentów modelu strumienicy. Zaobserwowano wysoką czułość modelu strumienicy na odpowiednie skalibrowanie



sprawności komory mieszania. Następnie model został poddany szczegółowej walidacji w oparciu o dane eksperymentalne z prototypowych systemów. Proces walidacji obejmował porównanie przewidywań modelu ze zmierzonymi wartościami kluczowych parametrów, takich jak wskaźnik eżekcji, spręż strumienicy i oraz całkowita sprawność, w różnych warunkach pracy. Sprawności komponentów strumienicy wykorzystane w obliczeniach modelu zostały zoptymalizowane w celu zapewnienia maksymalnej dokładności oszacowania MER dla każdej serii pomiarowej. Uzyskano zadowalającą dokładność oszacowania uzyskano kluczowych parametrów pracy strumienicy. Model jest jednak wrażliwy na zmianę sprawności przyjętych komponentów, zwłaszcza w przypadku czynnika chłodniczego R1233zd(E), i wymaga ich kalibracji w przypadku znaczącej zmiany parametrów pracy strumienicy. Potwierdziła to próba kalibracji modelu dla wszystkich punktów pracy zarejestrowanych w trzech pierwszych seriach pomiarowych i kalibracja modelu dla wszystkich punktów pracy kalibracja modelu dla wszystkich punktów pracy systemu MARANI CHILLER 600 w czwartej kampanii pomiarowej, które różniły się znacząco warunkami brzegowymi, występującymi na wlotach dysz napędowych strumienic. Aby zaprojektować strumienicę dla danych warunków pracy, należy wykorzystać wyniki eksperymentalne z podobnym przegrzaniem na wlotach w celu oszacowania stałych sprawności komponentów strumienicy. Gdy jako czynnik roboczy zastosowano nowy czynnik chłodniczy R1233zd(E), uzyskano zaskakująco niską wartość sprawności rozprężania izentropowego w dyszy ssącej strumienicy w porównaniu z czynnikami chłodniczymi opisanymi wcześniej w literaturze. Jednak optymalizacja wydajności komponentów strumienicy w celu uzyskania wysokiej dokładności w MER może skutkować zmniejszoną dokładnością szacowania stosunku ciśnień w strumienicy. W związku z tym, aby wybrać odpowiednie wartości dla wydajności komponentów wyrzutnika, konieczne jest sklasyfikowanie tych parametrów zgodnie z ich znaczeniem lub zrównoważenie dokładności modelu między wspomnianymi parametrami wydajności. W przypadku czynnika roboczego R1234ze(E) zastosowanego w ostatniej kampanii pomiarowej, model strumienicy zapewniał szersze zastosowanie niezależnie od warunków brzegowych urządzenia, osiągając średnie błędy w zakresie współczynnika eżekcji, ciśnienia i szacowania wydajności strumienicy wynoszące odpowiednio 4,4%, 0% i 3,97%. Wniosek ten wymaga jednak potwierdzenia poprzez wykonanie większej liczby serii pomiarowych. Może to być również związane z wyższymi ciśnieniami roboczymi urządzenia.

Zweryfikowano również modele płytowych wymienników ciepła, tj. podgrzewacza, generatora, skraplacza, parownika i rekuperatora. W tym celu wykorzystano pomiary wykonane w pierwszych dwóch kampaniach pomiarowych ze względu na stabilne warunki pracy i pojedyncze występowanie wszystkich wymienionych wymienników ciepła w układzie. Uzyskano wysoką dokładność w szacowaniu temperatur wylotowych wymiennika ciepła oraz ciepła przekazywanego w wymienniku. W przypadku rekuperatora i parownika możliwe było porównanie spadków ciśnienia po gorącej stronie wymiennika ciepła, co również dało zadowalające wyniki. Błędy szacowania powyższych parametrów wynosiły na ogół poniżej 10%. W przypadku niektórych

punktów roboczych błędy oszacowania mieściły się w granicach 20%. Z reguły były to punkty pracy w pobliżu linii nasycenia, co generowało błędy wynikające z niemożności dokładnego porównania wspomnianych współczynników przenikania ciepła.

W wyniku testów eksperymentalnych osiągnięto współczynnik COP na poziomie 0,25 dla strumienicowego układu chłodniczego MARANI CHILLER 200 w warunkach chłodzenia wysokotemperaturowego po zastosowaniu modyfikacji geometrii strumienicy, co jest obiecującym wynikiem w obliczu ciepła odpadowego o bardzo niskiej temperaturze. Zastosowanie czynnika chłodniczego R1233zd(E) oferuje wiele korzyści w zakresie niskiego GWP i niepalności, nietoksyczności i niskiego ciśnienia roboczego, unikając ograniczeń i dodatkowych kosztów inwestycyjnych. Wyżej wymienione parametry i wydajność czynią ten czynnik chłodniczy obiecującym, zwłaszcza w rzeczywistych zastosowaniach przemysłowych. Zastosowanie niskociśnieniowego czynnika chłodniczego R1233zd(E) wiąże się jednak z poważnymi wyzwaniem. Najbardziej znaczącym wyzwaniem było zapewnienie wydajnej pracy systemu ze względu na wrażliwy wpływ spadków ciśnienia na wydajność strumienicy. Wniosek ten został potwierdzony przede wszystkim w trzeciej kampanii pomiarowej, która została przeprowadzona dla układu chłodzenia napędzanego ciepłem odpadowym o mocy 200 kW po wyeliminowaniu rekuperatora. Miało to bardzo znaczący wpływ na poprawę efektywności energetycznej.

Niewielkie straty ciśnienia generowane przez rekuperator, układu chłodniczego, rzędu 0,2 do 0,3 bar(a), powodowały jednak znaczny spadek temperatury nasycenia w skraplaczu. Powodowało to konieczność pracy strumienicy przy wyższych stosunkach ciśnień, co zmniejszało jego sprawność i powodowało zbyt szybkie przechodzenie jednostki w tryb pozaprojektowy. Po wyeliminowaniu strat ciśnienia, system działał znacznie wydajniej przy podobnych parametrach pracy, osiągając współczynnik COP na poziomie 0,25 dla niższego zasilania ciepłem odpadowym niż nominalne i chłodzenia wysokotemperaturowe. Przed zmniejszeniem strat ciśnienia w podobnych warunkach pracy, system działał ze współczynnikiem COP na poziomie 0,16. Wyeliminowanie rekuperatora umożliwiło również wykonanie serii pomiarów dla tzw. chłodzenia standardowego. Uzyskane wyniki nie zostały jednak uznane za zadowalające. Dla takich warunków pracy znacznie wydajniejszym czynnikiem chłodniczym jest wysokociśnieniowy R1234ze(E), który w podobnych warunkach pracy układu chłodniczego MARANI CHILLER 600 osiągnął współczynnik COP na poziomie 0,25.

Przyszłe badania skupią się na dalszej optymalizacji modelu matematycznego w celu zwiększenia jego dokładności i wydajności. Obejmuje to dopracowanie parametrów modelu i ulepszenie algorytmów obliczeniowych w celu skrócenia czasu przetwarzania. Dodatkowo model zostanie rozszerzony o szerszy zakres warunków pracy i konfiguracji systemu, dzięki czemu będzie bardziej wszechstronny i możliwy do zastosowania w różnych scenariuszach przemysłowych. Ponadto planowane jest wdrożenie, rozwój i testowanie prototypów w celu zbadania wydajności strumienicowych systemów chłodniczych w różnych warunkach przemysłowych, aby sprawdzić wydajność i elastyczność działania w trybie ciągłym. Obejmie to skalowanie prototypów, testowanie ich w rzeczywistych warunkach przemysłowych oraz ocenę ich długoterminowej niezawodności.