

Streszczenie

Rosnąca potrzeba poprawy efektywności energetycznej oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych zwiększyła zainteresowanie technologiami umożliwiającymi wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł ciepła odpadowego, szczególnie w przedziale poniżej 100°C , powszechnie występujących w przemyśle procesowym, górnictwie, hutnictwie oraz w sektorze komunalnym. Układy chłodnicze wykorzystujące energię ciepłą stanowią w tym kontekście obiecującą alternatywę dla konwencjonalnych, elektrycznie zasilanych jednostek sprężarkowych, ponieważ umożliwiają wytwarzanie chłodu przy istotnie zredukowanym zużyciu energii pierwotnej oraz większej odporności na wahania kosztów energii elektrycznej. Wśród rozwiązań termicznie napędzanych na szczególną uwagę zasługują strumienicowe układy chłodnicze (ang. Ejector Refrigeration Systems - ERS), które dzięki prostej budowie, niewielkiej liczbie elementów ruchomych, wysokiej niezawodności oraz kompatybilności z naturalnymi czynnikami roboczymi sprzyjają bezpiecznej, ekonomicznej i ekologicznej eksploatacji. Jednocześnie wiadomo, że parametry pracy konwencjonalnych strumienic o stałej geometrii (ang. Fixed Geometry Ejector - FGE) są wysoce wrażliwe na zmienne warunki graniczne, w szczególności na wahania temperatury i ciśnienia po stronie generatora oraz kondensatora. Prowadzi to do częstych przejść między obszarem on-design i off-design, skutkującym spadkiem współczynnika efekcji, a co za tym idzie obniżenia współczynnika efektywności energetycznej COP układu. W konsekwencji ograniczona elastyczność pracy FGE istotnie zmniejsza jej potencjał w zastosowaniach do odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego, gdzie zarówno dobowo-sezonowa zmienność temperatury otoczenia, jak i krótkookresowe fluktuacje temperatury źródła są zjawiskami powszechnymi.

Niniejsza praca doktorska przedstawia odpowiedź na to wyzwanie w postaci szczegółowej analizy numerycznej układu ERS zasilanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym, wyposażonego w strumienicę o zmiennej geometrii (ang. Variable Geometry Ejector - VGE), pracującą z naturalnym czynnikiem chłodniczym - propanem (R290). Celem badań było oszacowanie potencjału wykorzystania VGE jako elementu umożliwiającego dynamiczne dostosowanie efektywnego przekroju gardzieli dyszy napędowej do bieżących warunków pracy układu, a przez to utrzymanie działania strumienicy w pobliżu punktu projektowego i ograniczenie strat energetycznych, czego nie zapewniają klasyczne układy ze strumienicą o stałej geometrii.

Zakres przeprowadzonych prac obejmował kompleksową analizę eksperymentalną i numeryczną, w tym opracowanie oraz walidację modeli zredukowanych (ang. Reduced Order Model - ROM) strumienicy w oparciu o dane uzyskane z obliczeń CFD, a następnie ich implementację do analiz dynamicznych pełnego

systemu w oprogramowaniu Dymola, opartym na języku modelowania zorientowanego obiektowo Modelica. Zbudowany model umożliwił nie tylko porównanie zachowania układów ERS z VGE i FGE w zmiennych warunkach rzeczywistych, ale również oszacowanie korzyści energetycznych i operacyjnych wynikających z zastosowania zmiennej geometrii, ocenę stabilności dynamicznej oraz przygotowanie podstaw do przeniesienia opracowanego modelu na inne naturalne czynniki chłodnicze i ich mieszaniny w dalszych etapach badań.

Rozdział 1 poświęcony został przeglądowi literatury dotyczącej systemów wykorzystujących ciepło odpadowe do wytwarzania chłodu oraz technologii strumienicowych w układach chłodniczych. Omówiono w nim główne kierunki rozwoju termicznie napędzanych układów chłodniczych, ze szczególnym uwzględnieniem systemów wykorzystujących niskotemperaturowe źródła ciepła oraz naturalne czynniki robocze. Przedstawiono charakterystykę klasycznych technologii absorpcyjnych, adsorpcyjnych i strumienicowych, wskazując ich zalety, ograniczenia oraz zakresy stosowalności.

W dalszej części rozdziału dokonano systematyzacji budowy strumienic stosowanych w układach ERS, obejmującej podział na strumienice o stałej geometrii (FGE) oraz rozwiązania z możliwością regulacji przekroju - zarówno mechanicznej, jak i hydraulicznej. Szczególną uwagę poświęcono dotychczasowym badaniom nad strumienicami o zmiennej geometrii (VGE), w tym przeglądowi ich rozwiązań konstrukcyjnych, metod sterowania i wyników eksperymentalnych, które potwierdzają możliwość zwiększenia sprawności układów termicznie napędzanych poprzez adaptację przekroju dyszy napędowej do bieżących warunków pracy. Na zakończenie rozdziału przedstawiono aktualne kierunki rozwoju technologii ERS w kontekście dekarbonizacji systemów chłodniczych, rosnących wymagań regulacyjnych dotyczących czynników chłodniczych oraz postępu w zakresie numerycznego modelowania przepływów dwufazowych w strumienicach.

Rozdział 2 przedstawia koncepcję wykorzystanej w pracy strumienicy VGE, jej szczegółową geometrię, zasadę działania oraz założenia konstrukcyjne opracowanego rozwiązania. Wprowadzenie zmiennej geometrii do klasycznej konstrukcji strumienicy stanowi istotny krok w kierunku zwiększenia elastyczności i zakresu pracy układów ERS, umożliwiając ich stabilne działanie w warunkach, w których konwencjonalne strumienice FGE wykazują znaczące spadki wydajności. Kluczową cechą analizowanej konstrukcji jest możliwość regulacji efektywnego pola przekroju gardzieli dyszy napędowej poprzez osiowy ruch igły, wprowadzanej współosiowo do kanału przepływowego. Takie rozwiązanie pozwala na zmianę parametrów przepływu w dyszy napędowej, w tym ciśnienia i prędkości w gardzieli, co umożliwia dostosowanie współczynnika eżekcji do aktualnych warunków pracy układu chłodniczego. W konsekwencji strumienica VGE może utrzymywać stabilną pracę w pobliżu punktu projektowego nawet przy znaczących wahaniami temperatury źródła ciepła lub temperatury skraplania, minimalizując ryzyko przejścia w obszar i związane z

tym utraty zdolności zasysania strumienia ssawnego.

Geometria strumienicy wykorzystanej w niniejszej pracy została opracowana na podstawie projektu zaprezentowanego przez Besagniego i Cristianiego, którzy w swoich badaniach numerycznych wykorzystali oprogramowanie ANSYS Fluent do analizy przepływu czynnika R290 w strumienicy z igłą. Autorzy zastosowali podejście oparte na równaniach RANS i modelu turbulencji SST, umożliwiające dokładne odwzorowanie pracy urządzenia. Wyniki ich analiz CFD pozwoliły na wytypowanie optymalnej geometrii dyszy napędowej i komory mieszania spośród analizowanych, tak aby zapewnić maksymalną efektywność współczynnika eżekcji przy zachowaniu stabilności przepływu. Wykazano, że poprzez zmianę przekroju gardzieli dyszy napędowej można skutecznie modulować zarówno strumień masowy strumienia napędowego, jak i współczynnik eżekcji, co stanowi podstawę działania rozwiązania typu VGE. Zaletą takiego podejścia jest możliwość wykorzystania jednej strumienicy do pracy w szerokim zakresie warunków ciśnieniowych i temperaturowych, co w praktyce pozwala na zastąpienie zestawu kilku klasycznych FGE o różnych parametrach geometrycznych.

Na potrzeby badań eksperymentalnych wyprodukowana została strumienica wykonana z elementów mosiężnych z wykorzystaniem technik toczenia i frezowania. Elementy korpusu zostały połączone za pomocą śrub i uszczelnień z gumy nitylowej (NBR), umieszczonych w specjalnie zaprojektowanych rowkach, co zapewniło szczelność całego układu do ciśnienia 60 bar. Dla zapewnienia możliwości precyzyjnej regulacji położenia igły zastosowano głowicę mikrometryczną z podziałką umożliwiającą kontrolę położenia w zakresie 0-7 mm z rozdzielczością 0.01 mm. Rozwiązanie to pozwoliło na przeprowadzenie serii testów eksperymentalnych, w których możliwe było dokładne odwzorowanie zależności między przekrojem gardzieli a współczynnikiem eżekcji. Szczególną uwagę zwrócono na jakość wykonania powierzchni wewnętrznych kanałów przepływowych, które mają kluczowy wpływ na wartość współczynnika eżekcji. Zastosowane procesy obróbki zapewniły chropowatość powierzchni na poziomie $R_a = 1.25$, co pozwoliło na ograniczenie tarcia w komorze mieszania i związanego z nim spadku strumienia ssawnego. Uzyskane tolerancje wymiarowe poniżej ± 0.01 mm dla wymiarów liniowych oraz $\pm 0.1^\circ$ dla kątów stożkowych potwierdzają wysoką precyzję wykonania, niezbędną dla zachowania.

Wyprodukowany prototyp VGE stanowi w pełni funkcjonalne rozwiązanie badawcze, które może służyć zarówno do kalibracji modeli numerycznych, jak i do testów eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych. Zaprezentowana w rozdziale koncepcja VGE stanowi podstawę dla dalszych analiz przedstawionych w kolejnych częściach pracy, obejmujących opracowanie modeli zredukowanych oraz ich implementację w analizach dynamicznych strumieniowego układu chłodniczego.

Rozdział 3 opisuje badania eksperymentalne strumienicy VGE. Celem badań eksperymentalnych było określenie wpływu położenia igły dla analizowanych pozycji igły ze zmianą co 1 mm na charakterystykę pracy urządzenia oraz charakter przepływu w zmiennych warunkach pracy. Badania przeprowadzono na dedykowanym stanowisku połączonym z instalacją pompy ciepła na R290, umożliwiającym jednoczesny pomiar strumieni masowych, temperatury oraz profili ciśnienia statycznego wzdłuż korpusu strumienicy dzięki licznym portom do pomiaru ciśnienia. Ze względu na ograniczenia sprężarki zainstalowanej w instalacji badawczej i przewymiarowanego zaworu rozprężnego, badany zakres pracy urządzenia odbiegał od punktu projektowego strumienicy. Podczas badań eksperymentalnych warunki ciśnieniowe oraz temperaturowe czynnika na wlocie dyszy napędowej wynosiły 15.8-20.2 bar oraz 80-105°C, na wlocie dyszy ssawnej 2.2-5.4 bar oraz 22-36°C, a ciśnienie na wylocie ze strumienicy było w zakresie 2.3-6.0 bar. Przeanalizowano prace strumienicy dla czterech pozycji igły: SP0, SP2, SP4 i SP7. Procedura pomiarowa uwzględniała dojście do stanu ustalonego i rejestrację pięciominutowej pracy urządzenia. W zakresie sterowania wydajnością uzyskano systematyczny spadek strumienia masowego w dyszy napędowej z około 36 kg/h (SP0) do około 12 kg/h (SP7). Strumień dyszy ssawnej wzrastał przesuwając igłę z pozycji nominalnej SP0 do SP3 (4.4 kg/h), po czym malał aż do pozycji SP7, która była ostatnią pozycją igły, dla której strumienica pracowała z dodatnim stosunkiem eżekcji. Krzywe sprawności strumienicy prezentujące stosunek eżekcji w funkcji zmiennego ciśnienia wylotowego strumienicy dla analizowanych pozycji igły wykazały przyrost stosunku eżekcji wraz ze wzrostem SP. Pozycja SP4 zapewniła najlepszy kompromis między poziomem eżekcji, stabilnością pracy i szerokością okna operacyjnego (łagodniejszy spadek stosunku eżekcji w obszarze off-design), podczas gdy SP7 osiągało najwyższy stosunek dla wąskiego zakresu ciśnienia wylotowego i charakteryzowało się największą wrażliwością na odchylenia ciśnienia od wartości ciśnienia punktu krytycznego. Uzyskane wyniki eksperymentalne wykazały, że zmniejszenie pola przekroju gardzieli o 35% prowadzi do zwiększenia współczynnika eżekcji, przy jednoczesnym spadku strumienia napędowego o około 60%, co potwierdza możliwość skutecznej modulacji wydajności przy zachowaniu stabilnej pracy strumienicy. Analiza profili ciśnienia statycznego wewnątrz urządzenia wykazała, że charakter przepływu wewnątrz urządzenia nie jest zależny od ustawienia igły, a jedynie od warunków pracy strumienicy, tj. ciśnienia i temperatury na wlotach i ciśnienia wylotowego. Zestawienie punktów krytycznych strumienicy dla analizowanych ustawień igły pozwoliło na wyznaczenie linii pracy strumienicy, która w odróżnieniu od trendów quasi-liniowych prezentowanych w literaturze dla warunków projektowych - przyjęła zakrzywiony kształt. Różnice względem wartości współczynnika eżekcji uzyskanych w badaniach eksperymentalnych względem symulacji CFD prezentowanych w literaturze wynikają głównie z niższego ciśnienia napędowego ograniczonego kopertą pracy sprężarki, zainstalowanym w stanowisku zaworem rozprężnym, oraz potencjalnego wpływu

portów do pomiaru ciśnienia na charakter przepływu wewnątrz urządzenia.

Rozdział 4 jest poświęcony opracowaniu modeli ROM zbudowanych na podstawie wyników CFD. Celem modeli było zbudowanie szybkiego i wysoce dokładnego narzędzia które wiernie odwzorowuje prace urządzenia w zależności od zmiennych parametrów pracy urządzenia, przy znacznym skróceniu czasu obliczeń w porównaniu z pełnymi modelami CFD. Zaproponowano dwa podejścia: model bazowy VGE ROM wykorzystujący jako parametry wejściowe ciśnienie i entalpie właściwą, model uogólniony - Universal Low-pressure Fluid (ULF-VGE ROM), którego struktura umożliwia przenoszenie zależności działania strumienicy w różnych warunkach pracy na inne czynniki robocze o zbliżonych właściwościach termofizycznych dzięki wykorzystaniu stosunków ciśnień i temperatury na dyszach wlotowych zamiast podejścia ciśnieniowo-entalpowego. Do budowy obu modeli ROM wykorzystano wyniki CFD obejmujące osiem położzeń igły (SP0-SP7) i szeroki zakres ciśnień wlotowych i wylotowych. Model VGE ROM zbudowano na podstawie wyznaczonej koperty pracy urządzenia na wykresie p-h, gdzie ciśnienie i entalpia właściwa na wlocie do dyszy napędowej determinują strumień napędowy, a wartość strumienia ssawnego zależy od wartości ciśnienia i temperatury na obu dyszach wlotowych i ciśnienia wylotowego. Model ten odwzorowuje charakterystykę rzeczywistego urządzenia z błędem względnym poniżej 1% względem wyników CFD i stanowi efektywne narzędzie do analiz dynamicznych układu chłodniczego opartego na R290. Drugi z modeli, ULF-VGE ROM rozszerza aplikacje modelu strumienicy VGE zaprojektowanej dla R290 poprzez wykorzystanie uogólnionych wielkości bezwymiarowych, tj. stosunków ciśnień p_{MN}/p_{out} i p_{SN}/p_{out} , oraz temperatur wlotowych strumienia napędowego i ssawnego. Taka formuła eliminuje bezpośrednią zależność od konkretnego czynnika i umożliwia wykorzystanie modelu dla innych czynników chłodniczych o zbliżonych właściwościach, takich jak propylen (R1270), butan (R600), izobutan (R600a), eter dimetylowy, czy mieszaniny R290 z wymienionymi czynnikami. Dzięki temu ULF-VGE ROM może być stosowany jako uniwersalny model strumienicy VGE dla analiz porównawczych innych naturalnych czynników chłodniczych i ich mieszanin w systemach ERS wykorzystujących ciepło odpadowe. Zaproponowane modele ROM umożliwiają modelowanie strumienicy o zmiennej geometrii i jej integrację na potrzeby analiz systemowych układu ERS łącząc dokładność odwzorowania przepływu supersonicznego z wydajnością obliczeniową nieosiągalną dla klasycznych analiz numerycznych CFD.

Rozdział 5 opisuje szczegółową analizę dynamiczną układu ERS wyposażonego w strumienicę VGE, przeprowadzoną w oparciu o opracowane modele ROM oraz rzeczywiste historyczne dane temperaturowe dla trzech lokalizacji reprezentujących odmienne strefy klimatyczne: Gliwice (klimat umiarkowany z dużą dobową zmiennością temperatur), Trondheim w Norwegii (klimat chłodny i stabilny) oraz Mediolan we Włoszech (klimat ciepły o niewielkich amplitudach dobowych). Celem analiz było określenie wpływu zmiennej temperatury

otoczenia na parametry pracy układu ERS wyposażonego w VGE względem analogicznego układu wykorzystującego klasyczną strumienicę FGE. Przeprowadzone symulacje dynamiczne pozwoliły na ocenę wpływu zmienności warunków otoczenia w cyklu dobowym, a także na identyfikację obszarów, w których sterowanie pozycją igły strumienicy zapewnia największe korzyści energetyczne.

Do analiz wykorzystano rzeczywiste profile temperatur powietrza pochodzące z danych meteorologicznych dla reprezentatywnych dni letnich, co umożliwiło odwzorowanie naturalnych wahań temperatury otoczenia w zakresie od 8.6 do 27.9°C. Dodatkowo uwzględniono algorytm sterowania położeniem igły, którego zadaniem było utrzymywanie pracy strumienicy w pobliżu punktu projektowego poprzez wybór optymalnej pozycji SP w funkcji aktualnych warunków termodynamicznych układu. Dzięki temu układ mógł adaptacyjnie reagować na zmieniające się temperatury otoczenia, zachowując wysoką stabilność działania.

W warunkach największych dobowych wahań temperatury, charakterystycznych dla klimatu umiarkowanego (Gliwice), zastosowanie strumienicy VGE przyniosło szczególnie korzystne efekty. Uzyskano wzrost średniodobowego współczynnika COP o 52% oraz wzrost mocy chłodniczej o 13% w porównaniu z układem wyposażonym w strumienicę FGE. Tak duży przyrost wynikał z możliwości bieżącej korekty przekroju gardzieli dyszy napędowej, dzięki czemu VGE utrzymywała warunki zbliżone do optymalnych pomimo dynamicznych zmian ciśnienia skraplania i temperatury otoczenia. Analiza czasowa wykazała, że w godzinach południowych, gdy temperatura otoczenia osiągała wartości maksymalne, niewielka korekta położenia igły (o około 1-2 mm) pozwalała utrzymać współczynnik efektywności na stabilnym poziomie i zapobiegała spadkom wydajności obserwowanym w klasycznych układach FGE.

Dla klimatu gorącego, reprezentowanego przez Mediolan, korzyści z zastosowania VGE również były zauważalne, choć w mniejszym stopniu niż w przypadku Gliwic. Uzyskany wzrost efektywności energetycznej wyniósł około 18%, przy jednoczesnym zwiększeniu mocy chłodniczej o około 8%. Ze względu na mniejsze wahania temperatury dobowej, zakres ruchu igły był ograniczony, a liczba interwencji sterowania niewielka, co potwierdziło, że system VGE w takich warunkach wymaga mniej dynamicznej regulacji. Wysokie temperatury otoczenia skutkowały jednak wzrostem ciśnienia skraplania, co bezpośrednio wpływało na punkt pracy strumienicy. Dzięki zastosowaniu zmiennej geometrii, układ był w stanie utrzymać dodatni stosunek efektywności i zapobiec wystąpieniu zjawiska cofania przepływu (backflow).

W przypadku chłodnego i stabilnego klimatu Trondheim wpływ zastosowania strumienicy VGE był najmniejszy, co wynikało z ograniczonej zmienności temperatur otoczenia oraz niewielkich zmian ciśnienia w obiegu. W takich warunkach klasyczna strumienica FGE pracowała w pobliżu swojego

punktu optymalnego przez większość czasu, a wprowadzenie zmiennej geometrii skutkowało jedynie marginalnym wzrostem COP na poziomie kilku procent. Niemniej jednak analiza potwierdziła, że nawet przy niewielkiej zmienności warunków zewnętrznych VGE zachowuje stabilność pracy i może reagować na krótkotrwałe fluktuacje temperatur, gwarantując stałą moc chłodniczą w dłuższej perspektywie.

Przeprowadzona analiza dynamiczna potwierdziła, że największe korzyści z zastosowania strumienicy VGE uzyskuje się w warunkach dużej zmienności temperatury otoczenia, typowych dla klimatów ciepłych i umiarkowanych. System VGE, dzięki zdolności automatycznej adaptacji przekroju gardzieli, utrzymuje pracę strumienicy w trybie on-design przez większość cyklu dobowego, co bezpośrednio przekłada się na poprawę sprawności energetycznej i stabilności całego układu ERS. W chłodnych strefach klimatycznych, mimo ograniczonych różnic w uzyskanych wartościach COP, technologia ta zachowuje swoje zalety konstrukcyjne, takie jak odporność na fluktuacje ciśnienia w skraplaczu oraz możliwość pracy przy zmiennych warunkach obciążenia, co czyni ją uniwersalnym rozwiązaniem dla szerokiego zakresu zastosowań w systemach chłodniczych napędzanych ciepłem odpadowym.

W Rozdziale 6 opisana została analiza działania układu ERS wyposażonego w strumienicę VGE w warunkach rzeczywistych, zasilanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym. Głównym celem było określenie wpływu zmiennych w czasie warunków cieplnych źródła ciepła oraz temperatury otoczenia na stabilność i efektywność pracy układu, a także ocena skuteczności sterowania położeniem igły strumienicy wykorzystując opracowane modele ROM. Model systemu ERS został rozszerzony o rzeczywiste dane temperaturowe z trzech źródeł przemysłowych: kopalni, kuźni i fabryki łożysk, co pozwoliło na analizie wpływu krótkotrwałych, jak i dobowych fluktuacji temperatury ciepła odpadowego. Analizie wykonano dla trzech lokalizacji klimatycznych z Rozdziału 5, tj. Gliwic, Mediolanu i Trondheim, reprezentujących różne strefy klimatyczne. Analizy objęły dziewięć przypadków (A-I) będących kombinacjami profili temperaturowych źródła ciepła i temperatury otoczenia. Dla każdego z przypadków przeprowadzono 24-godzinne symulacje, analizując wpływ zmiennych warunków pracy na pracę strumienicy VGE, jak i wydajność chłodniczą i współczynnik COP układu chłodniczego. Opracowany algorytm sterowania igłą regulował jej położenie w zakresie SP0-SP7 wybierając optymalne ustawienie igły w oparciu o algorytm maksymalizujący wartość strumienia ssawnego strumienicy. Dodatkowo przeprowadzono analizę wpływu przegrzania czynnika w generatorze i parowniku (1-6 K) na stabilność i sprawność układu. Uzyskane wyniki wykazały wyraźną zależność parametrów systemu od stabilności źródła ciepła i warunków otoczenia. W przypadkach z najbardziej stabilnym źródłem (kopalnia) system charakteryzował się płynną pracą, niewielką liczbą korekt położenia igły i najwyższymi wartościami średniodobowego COP na poziomie 0.46 dla przypadku Gliwic,

0.34 dla Mediolanu i 0.61 dla Trondheim. W warunkach dynamicznie zmiennego źródła (kuźnia, fabryka łożysk) pojawiały się krótkookresowe oscylacje SP oraz spadki COP o 10-15%, wynikające z wymuszonej pracy strumienicy poza jej projektowym zakresem pracy. Z kolei chłodniejszy klimat Trondheim charakteryzował się najwyższą średniodobową mocą chłodniczą do 4.3 kW, przy najniższym poziomie poboru ciepła odpadowego w generatorze na poziomie 7 kW. Dla Mediolanu uzyskano najniższe COP poziomie 0.33 ze względu na wysoką temperaturę otoczenia i zwiększone ciśnienie skraplania, bezpośrednio związane z warunkami na wylocie strumienicy i pogarszające jej pracę. Wszystkie przeprowadzone symulacje potwierdziły zdolność VGE do kompensacji dynamicznych zmian temperatury poprzez ciągłą modulację pozycji igły, co pozwala utrzymać stabilne działanie układu ERS w szerokim zakresie warunków eksploatacyjnych. Ustalono, że największą efektywność zapewnia połączenie stabilnego źródła ciepła z umiarkowanymi temperaturami otoczenia, minimalizujące liczbę interwencji sterowania. W warunkach zmiennych VGE nadal utrzymuje poprawną pracę urządzenia, jednak przy zwiększonych stratach efektywności wynikających z częstych przejść w rejony pracy poza punktem optymalnym. Wyniki jednoznacznie potwierdzają, że zastosowanie strumienicy o zmiennej geometrii znacząco rozszerza zakres stabilnej pracy i umożliwia wykorzystanie niskotemperaturowych źródeł przemysłowych do celów chłodniczych w zróżnicowanych warunkach klimatycznych, stanowiąc perspektywiczne rozwiązanie dla systemów odzysku ciepła odpadowego nowej generacji.

Rozdział 7 poświęcono ocenie możliwości wykorzystania innych naturalnych czynników chłodniczych i ich mieszanin w układzie ERS ze strumienicą VGE zaprojektowaną dla R290. Celem badań było określenie, w jakim stopniu uniwersalny model ULF-VGE ROM umożliwia przeniesienie charakterystyki pracy strumienicy na inne czynniki bez konieczności ponownego projektowania jej geometrii. Dzięki bezwymiarowości modelu ROM opartemu na wartościach współczynnika eżekcji i wykorzystującego bezwymiarowe stosunki ciśnień, model pozwala na analizę pracy układu ERS z różnymi czynnikami. Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie procedury preselekcji czynników o zbliżonej charakterystyce do R290. W oparciu o relacje dwóch bezwymiarowych stosunków ciśnień w punkcie reprezentatywnym (85°C, 5°C, 20°C) przyjęto tolerancję $\pm 10\%$ względem wartości referencyjnych dla R290. Analiza wykazała, że jedynie R1270 spośród czystych czynników mieści się w granicach dopuszczalnych odchyłeń. Z mieszanin do dalszych analiz wybrano mieszaniny R290 z R1270, R600a oraz DME. Wykorzystany model ULF-VGE ROM pozwolił na odwzorowanie charakterystyki pracy strumienicy VGE z innymi czynnikami chłodniczymi dzięki wykorzystaniu współczynnika eżekcji jako parametru wyjściowego z modelu zredukowanego. W celu zamodelowania strumienia napędowego dla innych czynników wykorzystano matematyczny model dyszy napędowej oparty na korelacji Brennena, umożliwiający oblicze-

nie krytycznego strumienia masowego dla dwufazowego przepływu w dyszy napędowej. Symulacje z wykorzystaniem rzeczywistych profili temperatur dla Gliwic i temperatury ciepła odpadowego z kuźni wykazały, że zastosowanie R1270 lub mieszanin R290/R1270 skutkuje wyraźnym wzrostem efektywności układu ERS, a uzyskane średniodobowe wartości COP na poziomie około 0.55 wykazały wzrost o około 10% względem R290 oraz moc chłodniczą na poziomie 4.5 kW, czyli około 19% wyższą niż dla przypadku z R290. Mieszanina R290 z R1270 i R600a wykazała wyniki zbliżone, choć nieco niższe od czystego R290, co sugeruje niekorzystny wpływ domieszki izobutanu. Z kolei mieszaniny R290/DME powodowały systematyczny spadek sprawności, a dla udziału DME na poziomie 50% wartości COP i mocy chłodniczej obniżyły się odpowiednio o 6% i 20% względem przypadku z R290. Wnioski z przeprowadzonych analiz wskazują, że strumienica VGE zoptymalizowana dla R290 może być z powodzeniem stosowana dla R1270 i jego mieszanin, zapewniając poprawę wydajności i stabilności pracy układu bez konieczności zmian geometrii strumienicy. Zastosowanie domieszek DME lub cięższych węglowodorów (R600/R601) nie przynosi korzyści działania układu. Wyniki te potwierdzają uniwersalność opracowanego modelu ULF-VGE ROM oraz jego przydatność do oceny potencjału naturalnych czynników w systemach odzysku ciepła odpadowego. Przeprowadzone analizy pozwoliły stwierdzić, że opracowany model ULF-VGE ROM może zostać wykorzystany jako narzędzie do oszacowania działania układu ERS ze strumienicą VGE dla innych czynników chłodniczych o podobnych właściwościach, jednak wymaga poszerzenia koperty danych wejściowych rozszerzenia zakresu pracy o większą ilość czynników, zwłaszcza w kierunku wyższych stosunków ciśnień. Dla mieszanin o znacznie różnych właściwościach od R290 sugeruje się ponowną kalibrację parametrów charakterystycznych geometrii strumienicy, tak aby zachować jej wysoce sprawne działanie dla szerokiego zakresu pracy urządzenia.

Podsumowując, uzyskane wyniki dowodzą, że pojedyncza strumienica o zmiennej geometrii może zastąpić zestaw klasycznych strumienic o stałej konstrukcji, znacząco rozszerzając zakres stabilnej pracy układu chłodniczego zasilanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym. Opracowany system sterowania igłą zapewnia elastyczność i szybkie dostosowanie do zmiennych warunków, co stanowi istotny krok w kierunku komercyjnego wykorzystania technologii VGE w systemach chłodniczych wykorzystujących ciepło odpadowe.

Dalszy rozwój badań nad strumienicowymi układami chłodniczymi opartymi na naturalnych czynnikach roboczych powinny koncentrować się na doskonaleniu zarówno metod modelowania, jak i rozwiązań konstrukcyjnych. W pierwszej kolejności planowane jest opracowanie podejścia hybrydowego do modelu ROM łączącego dane pochodzące z obliczeń numerycznych CFD oraz z pomiarów eksperymentalnych strumienicy VGE. Tego typu integracja umożliwiłaby bardziej precyzyjną kalibrację modeli zredukowanych i znaczną poprawę ich dokładności w obszarach poza projektowym punktem pracy urządzenia.

Drugim planowanym kierunkiem rozwoju jest implementacja ciągłego, liniowego sterowania pozycją igły, co zapewni płynną reakcję strumienicy na zmieniające się warunki pracy. Rozwiązania te pozwolą technologii VGE stanie się w pełni adaptacyjnym elementem systemu chłodniczego. W kontekście zastosowań przemysłowych, sugerowane jest rozważenie wykorzystania modułów wielostrumienicowych, w których kilka strumienic o różnych konfiguracjach geometrycznych pracuje równolegle, w połączeniu ze strumienicą VGE, co umożliwiłoby elastyczne zarządzanie strumieniem czynnika chłodniczego i maksymalizację sprawności układów ERS.