

Prof. dr hab. inż. **Dorota Chwieduk**
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Ciepłej
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25

Warszawa 19 II 2025

RECENZJA
rozprawy doktorskiej

„The development of the application for components selection to the ejector refrigeration systems, driven by low-grade waste heat from industrial processes, based on the mathematical model and the experiments on the prototype refrigeration aggregates”

Pana mgr inż. Mikołaja MASTROWSKIEGO

1. Podstawa opracowania opinii

Podstawę formalną niniejszego opracowania stanowi pismo Pana prof. dr hab. Krzysztofa Labusa Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 9.01.2025 r. z prośbą o opracowanie recenzji rozprawy doktorskiej *„The development of the application for components selection to the ejector refrigeration systems, driven by low-grade waste heat from industrial processes, based on the mathematical model and the experiments on the prototype refrigeration aggregates”* pana mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 19.12.2024. Rozprawa została przesłana pocztą tradycyjną w formie wydrukowanej a także elektronicznie.

Podstawę prawną stanowi Ustawa *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. *Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej* z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V *Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki*, Rozdział 2 *Stopień doktora*, Oddział 1 *Nadawanie stopnia doktora*, Art.187.

Merytoryczną ocenę dokonałam na podstawie treści przesłanej rozprawy.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska „*The development of the application for components selection to the ejector refrigeration systems, driven by low-grade waste heat from industrial processes, based on the mathematical model and the experiments on the prototype refrigeration aggregates*” („Opracowanie aplikacji do doboru komponentów dla strumieniowych układów chłodniczych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych na podstawie modelu obliczeniowego i pomiarów eksperymentalnych na prototypowych agregatach chłodniczych”) pana mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego została wykonana pod promotorstwem prof. dr hab. Jacka Smółka z Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. Dariusza Butrymowicza z Politechniki Białostockiej i dr Łukasza Antczaka z firmy Marani Ltd. z Zabrze, jako promotora pomocniczego.

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Składa się ona z sześciu numerowanych rozdziałów, które mają następujące tytuły: rozdział 1 – *Introduction (Wstęp)*, (11 stron); rozdział 2 – *Problem description (Opis problemu)*, (6 stron); rozdział 3 – *Test rigs and experiments (Stanowiska testowe i eksperymenty)*, (11 stron); rozdział 4 – *Mathematical model of the system components (Model matematyczny elementów składowych systemu)*, (48 stron); rozdział 5 – *Results and discussion (Wyniki i dyskusja)*, (52 strony); rozdział 6 – *Summary and conclusions (Podsumowanie i wnioski)* (4 strony). Po rozdziałach numerowanych zamieszczone są: *Bibliografia, Abstract i Streszczenie*. Natomiast przed rozdziałami głównymi rozprawy znajdują się *Podziękowania, Przedmowa, Spis treści i Nomenklatura*. Bibliografię stanowi spis 104 pozycji literaturowych, wśród których dwie są w języku polskim. Dwa artykuły są współautorstwa Kandydata, w jednym z nich jest 8 współautorów, a Kandydat jest 6 współautorem, w drugim Kandydat jest pierwszym spośród 6 współautorów. Rozprawa zawiera 13 tabel i 54 rysunki. Całość liczy 152 strony.

Praca jest starannie przygotowana. Poszczególne rozdziały są odpowiednio ilustrowane, zdjęciami i schematami stanowisk badawczych, graficzną interpretacją modeli matematycznych symulowanych procesów w postaci schematów blokowych, wykresami z uzyskanymi wynikami obliczeniowymi, eksperymentalnymi polowymi (obiekty laboratoryjne Politechniki Białostockiej) oraz pomiarowymi w warunkach rzeczywistych w zakładzie przemysłowym (w Sosnowcu) na prototypowych agregatach chłodniczych. Poszczególne rozdziały są dobrze ze sobą powiązane i stanowią spójną całość.

Tytuł rozprawy bardzo dobrze odzwierciedla analizowany problem badawczy, chociaż jest rozbudowany.

2.2 Treść i ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa doktorska jest napisana na bardzo wysokim poziomie i obrazuje ogrom

pracy badawczej włożonej w jej przygotowanie przez Kandydata i cały zespół uczestniczący w badaniach. Przedstawienie w bardzo szczegółowy sposób przeprowadzonego przeglądu literatury, udokumentowanie podjęcia się przedmiotowych badań, sformułowanie głównego celu i zakresu pracy oraz sposobu rozwiązania problemu badawczo - wdrożeniowego, opis wykonanych analiz teoretycznych, w tym w szczególności modelowania matematycznego i symulacji obliczeniowych, a także duża liczba przeprowadzonych badań eksperymentalnych w rzeczywistym obiekcie przemysłowym, a także w warunkach polowych w specjalnie przygotowanym zewnętrznym laboratorium badawczym na uczelni, a następnie wnikliwa analiza uzyskanych wyników, oraz sformułowane wnioski o charakterze podstawowym i aplikacyjnym, **stanowią o istotnej wyróżniającej się wartości naukowo – badawczej pracy.**

Układ treści jest przejrzysty i uporządkowany, co wynika z dobrze opracowanej struktury pracy. Poszczególne rozdziały koncentrują się na poszczególnych podstawowych zagadnieniach badawczych i odzwierciedlają chronologię przeprowadzonych prac. Rozdziały są odpowiednio ze sobą połączone i tworzą logiczną całość.

W rozdziale 1 (Introduction) uzasadniono podjęcie tematyki badawczej, dokonano przeglądu literatury systemów chłodniczych ze strumienicami, przedstawiając ich podstawowe elementy składowe, koncentrując się na strumienicach gazowych i ich trybach pracy, czynnikach chłodniczych stosowanych w obiegach chłodniczych ze strumienicami i ich efektywności funkcjonowania opisanej współczynnikami wydajności chłodniczej (COP). Rozdział ten w sposób usystematyzowany wprowadza w problematykę badawczą pracy. Autor przedstawia istnienie i możliwość wykorzystania ciepła odpadowego niskotemperaturowego jako ciepła napędowego w układach sorpcyjnych i strumienicowych, sygnalizując konkurencyjność układów strumienicowych w stosunku do sorpcyjnych, zwłaszcza do tych najczęściej stosowanych tj. absorpcyjnych bromolitowych, a przede wszystkim w stosunku do tradycyjnych agregatów chłodniczych zasilanych energią elektryczną.

Mgr inż. Mikołaj Mastrowski analizuje stosowane i opisane w literaturze modele matematyczne strumienic zero i jedno (0 i 1D) wymiarowe służące do oceny pracy strumienic gazowych w trybie pracy projektowej i poza-projektowej w różnych warunkach. Podkreśla, że stosowane modele opisują głównie funkcjonowanie strumienic nadkrytycznych jednofazowych, a eksperymentalna walidacja modeli matematycznych dotyczy „starszych” czynników chłodniczych HFC szkodliwych dla środowiska. Zauważa, że brak jest dobrze opisanych modeli matematycznych uwzględniających wszystkie elementy składowe systemów strumienicowych układów chłodniczych, zwłaszcza w układach zasilanych ciepłem niskotemperaturowym. Podkreśla, że brakuje informacji o sprawnościach składowych elementów układów strumienicowych przy wykorzystaniu nowych czynników chłodniczych. Nie ma również dostępnych komercyjnie systemów chłodniczych ze strumienicami napędzanymi ciepłem niskotemperaturowymi, ani wyników badań testowych tego typu układów. Tego typu uwagi dotyczą oczywiście czasu przed rozpoczęciem badań, w których

Kandydat brał udział jako członek zespołu badawczo – wdrożeniowego, i które w efekcie doprowadziły do pojawienia się komercyjnie dostępnych strumienicowych układów chłodniczych firmy Marani Ltd. Kandydat definiując brak badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych uzasadnił w sposób jasny i oczywisty konieczność podjęcia własnych badań naukowych w tym zakresie. Sformułowany **problem badawczy i jego składowe jasno zdefiniowały zakres koniecznych do przeprowadzenia prac i wykazały możliwość osiągnięcia istotnych korzyści wdrożeniowych, obrazując przy tym unikalność naukową podjętych prac w zakresie badań podstawowych i aplikacyjnych dotyczących technik chłodniczych i wykorzystania niskotemperaturowego ciepła odpadowego z procesów przemysłowych.**

W rozdziale 2 pt. „*Problem description*” Kandydat opisuje dwa prototypy urządzeń chłodniczych strumienicowych napędzanych ciepłem odpadowym przemysłowym niskotemperaturowym o mocy 200 kW i 600 kW, których celem jest chłodzenie procesowe i klimatyzacja obiektów przemysłowych. Kandydat przedstawia rozważania projektowe dotyczące tych dwóch prototypów, koncentrując się na warunkach ich pracy, uwzględniając różnice w ich projektach. Podstawowym elementem systemów chłodniczych są strumienice naddźwiękowe firmy Marani Ltd. Wyraźnie brakuje w tym miejscu informacji:

1. Czy Kandydat brał udział w tworzeniu koncepcji i projektu obu prototypów strumienicowych układów chłodniczych, i jeżeli tak, to jaka była jego rola?

W tym rozdziale poza schematami rozważanych prototypów, podane są szczegółowe dane co do parametrów wymienników ciepła i pomp, a także co do geometrii strumienic z wymiarami ich elementów składowych. Nasuwają się bardziej szczegółowe pytanie, a mianowicie:

2. W jaki sposób zwymiarowano strumienice, czy wykorzystano opracowaną przez Kandydata aplikację do doboru elementów składowych strumienicy?
3. Dlaczego geometria każdej z trzech równoległych strumienic w prototypie 600 kW różni się?

Co prawda, Kandydat wspomniał, że geometrie strumienic zostały zaprojektowane zgodnie z wytycznymi projektu badawczego (były jednym z jego kamieni milowych), który był realizowany m.in. wspólnie z firmą Marani Ltd., ale takie stwierdzenie nie daje odpowiedzi na postawione pytanie powyżej pytanie 2, a także nie wyjaśnia zakresu prac Kandydat w projekcie. Tekst pracy mógłby być uzupełniony o krótki opis projektu i jego wyników, oraz roli Kandydata w całości badań i poszczególnych zadaniach projektu. Na stronach internetowych firmy Marani Ltd. można znaleźć informacje o projekcie (POIR .01.01.01-00-0301/18) pt. „*Opracowanie dwóch układów chłodniczych wykorzystujących ciepło odpadowe o mocy cieplnej napędowej 600 kW i 200 kW dostosowanych do temperatury wody lodowej i chłodzenia wysokotemperaturowego*”, a także o patentach wynikających z realizacji ww. projektu, ale trudno znaleźć szczegółowe informacje o partnerach realizujących projekt i ich wkładzie

merytorycznym.

Rozdział 3 pt. „*Test rigs and experiments*” opisuje stanowiska badawcze i ich fazę testową. Pierwszy prototyp chłodziarki Marani Ltd. o mocy 200 kW został zainstalowany w fabryce łożysk TIMKEN w Sosnowcu i tam został przebadany. Ciepło odpadowe wykorzystywane do napędu strumienicowego obiegu chłodniczego pochodzi ze stacji sprężarek powietrznych. Drugi prototyp o mocy 600 kW był badany w warunkach polowych na terenie Politechniki Białostockiej, w specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku badawczym. Oba prototypy badane więc były w innych warunkach otoczenia zewnętrznego (co poza opisem dobrze ilustrują zdjęcia na rys. 3.1 i 3.3). Nasuwa się więc pytanie:

4. Czy rozważono w jaki sposób różne umiejscowienie obu prototypów pod kątem warunków otoczenia zewnętrznego (cieplnych) miało wpływ na ich pracę i wydajność?

Drugi prototyp, zainstalowany na terenie Politechniki Białostockiej, w czasie badań testowych była zasilany parą z kontenerowego generatora pary, co symulowało zasilanie ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych. Kandydat opisał metodykę prowadzenia badań testowych i pomiarów. Badania testowe przeprowadzono w 5 seriach testowych dla różnych rozwiązań układów chłodniczych, w różnych warunkach pracy, przy zastosowaniu czterokrotnie nowego czynnika chłodniczego R1233zd(E) dedykowanego do układów niskociśnieniowych, a jeden raz zastosowano czynnik chłodniczy R1234zd(E) do układów wysokociśnieniowych. Poszczególne serie testowe wymagały odpowiedniego przygotowania (modyfikacji) zarówno stanowisk badawczych, jak i samej procedury testowania. Kandydat opisał też zastosowane metody zbierania i przetwarzania danych oraz wyznaczania niepewności pomiaru. **Rozdział precyzyjnie przedstawia warunki i metody, które zostały wykorzystane do wstępnego przetestowania i przygotowania stanowisk badawczych w celu przygotowania ich do walidacyjnych badań eksperymentalnych.** Jednakże, Kandydat nie wskazał:

5. Jaka była jego rola i udział w badaniach testowych, w modyfikacji stanowisk badawczych i ustalaniu procedur badań eksperymentalnych?

Rozdział 4 pt. „*Mathematical model of the system components*” jest bardzo rozbudowany, tak jak sam model matematyczny. Rozdział ten jest bardzo istotny do oceny wkładu merytorycznego Kandydata w prowadzone badania i Jego osiągnięcia naukowego. Opracowany model matematyczny kompleksowego strumienicowego systemu chłodniczego uwzględnia modele jego głównych elementów składowych, takich jak: strumienica; wymienniki ciepła, do których należą: generator, podgrzewacz wstępny, parownik, skraplacz i rekuperator; a także pozostałych elementów, tj. zaworu rozprężnego i pompy. Model jest modelem iteracyjnym opracowanym do analizy termodynamicznej strumienicowego systemu chłodniczego. Na podkreślenie zasługuje, iż **model ten umożliwia projektowanie strumienicowych agregatów chłodniczych o różnych wydajnościach i pracy w różnych**

konfiguracjach (w pracy rozważono cztery), które różnią się obecnością podgrzewacza wstępnego (przed generatorem) i/lub wymiennikiem rekuperacyjnym (przed skraplaczem). Chociaż z jednej strony modele poszczególnych elementów strumienicowego układu chłodniczego są względnie proste, to **integracja modeli wszystkich elementów składowych w celu stworzenia zintegrowanego strumienicowego systemu chłodzenia pracującego w różnych warunkach zasilania generatora ciepłem napędowym przy różnych obciążeniach chłodniczych w wymaganych zakresach temperatur jest już bardzo złożona i wymaga zarówno dużej wiedzy podstawowej, jak i intuicji wdrożeńowej.** Zastosowana iteracyjna metoda obliczeniowa pomaga odpowiednio dopasować odpowiednie parametry geometryczne, cieplne i przepływowe poszczególnych elementów składowych układu chłodniczego do zadanych warunków pracy i stawianych wymagań. Dzięki opracowaniu modułowego systemu obliczeniowego i analizy iteracyjnej każdy z elementów systemu może być niezależnie modelowany i modyfikowany w razie potrzeby. **Opracowane modele matematyczne wymagały bardzo dobrej znajomości podstaw termodynamiki, wymiany ciepła i masy, oraz mechaniki płynów.**

Na podstawie opracowanego algorytmu matematycznego strumienicowego systemu chłodniczego i jego składowych można oszacować kluczowe parametry jego wydajności, w tym: współczynnik wydajności chłodniczej COP i strumień wymienianego ciepła. Można też wyznaczyć wymiary krytyczne i sprawność strumienicy oraz efektywność wymienników ciepła, przy zadanych danych wejściowych jakimi są ciepło odpadowe i wymagana moc chłodnicza. W tym miejscu nasuwa się pytanie:

6. Na ile dokładne są wprowadzane dane wejściowe dotyczące ciepła odpadowego i zapotrzebowania na moc chłodniczą? W jaki sposób może być brana pod uwagę ich zmienność w czasie, zarówno co do ilości ciepła odpadowego i zapotrzebowania na chłód, jak i ich poziomu temperatury?

Kandydat przedstawił przyjęte założenia, równania i algorytmy modelowania kolejno wszystkich elementów składowych strumienicowego systemu chłodzenia. Model zakłada trzy poziomy ciśnienia czynnika chłodniczego: wysokie ciśnienie nasycenia w generatorze, ciśnienie nasycenia czynnika w skraplaczu i niskie ciśnienie nasycenia w parowniku. Opracowany model umożliwia obliczenie spadków ciśnienia w wymiennikach ciepła, co umożliwia dobór tych wymienników i pompy cyrkulacyjnej. Bardzo dokładnie zostało opisane modelowanie samej strumienicy i wszystkich jej części, jako podstawowego elementu strumienicowego układu chłodzenia. Kandydat zwrócił uwagę na wagę oszacowania wydajności strumienicy i jej parametrów wylotowych w różnych warunkach pracy i przy różnych zakresach mocy systemu przy zastosowaniu względnie prostych i mało czasochłonnych metod obliczeniowych, uzasadniając w ten sposób wykorzystanie prostych modeli 0-D do opisu matematycznego strumienicy i innych elementów układu.

Przy opisie modelu strumienicy Kandydat napisał, że jest autorem metody obliczeniowej hipotetycznego gardła w komorze mieszania strumienicy. Kandydat prowadzi obliczenia

w sposób iteracyjny, dopasowując ciśnienie w hipotetycznym gardle do ciśnienia krytycznego i ciśnienia wlotowego ssania, przy którym przepływ czynnika wprowadzanego do strumienicy jest najwyższy. Takie podejście jest nowatorskie w stosunku do powszechnie stosowanego założenia, że czynnik wprowadzany do strumienicy osiąga prędkość dźwięku. Jest to pierwsze w pracy bezpośrednie stwierdzenie **o autorstwie osiągnięcia badawczego Kandydata, w tym przypadku w odniesieniu do założeń modelu i metody obliczeniowej.**

Cały model matematyczny strumienicy jest podzielony na dwie części, co odpowiednio ilustruje schemat blokowy obliczeń strumienicy na rys. 4.2. Jedna ścieżka obliczeniowa służy do wyznaczania geometrii strumienicy (tryb projektowania strumienicy), a druga do oceny jej wydajności (tryb analizy pracy strumienicy), przy czym możliwe jest prowadzenie obliczeń w warunkach projektowych i poza-projektowych. Model matematyczny strumienicy jako całości zawiera jej poszczególne elementy składowe, co dobrze widać na wspomnianym schemacie blokowym, na którym zaznaczono też odpowiednie ścieżki iteracyjne. Wszystkie wielkości wejściowe do obliczeń strumienicy, jak i otrzymane wielkości wyjściowe są zapisywane przy użyciu odpowiedniej biblioteki (tu: *Pandas*) w zbiorach danych typu *Data Frame*, i mogą być wykorzystywane w modelach pozostałych składowych układu chłodzenia.

Jak już wspomniano, rozważane są w pracy różne warianty konfiguracji układu chłodzenia, i nie wszystkie składowe występują we wszystkich konfiguracjach, tzn. nie wszystkie zawierają wstępny podgrzewacz i/lub wymiennik rekuperacyjny. Łącznie wymienników ciepła maksymalnie może być pięć. Zastosowane zostały dwie metody obliczeniowe. Jedna z nich podobnie jak w przypadku strumienicy jest metodą iteracyjną, przy czym model obliczeniowy jest prostszy (nie ma potrzeby obliczania modelu płytowego wymiennika ciepła w każdej iteracji). Wykorzystywane są równania zachowania energii w celu uzyskania odpowiedniego ciśnienia nasycenia w generatorze, parowniku i skraplaczu. Równania te są zapisywane w odniesieniu do każdej sekcji danego wymiennika indywidualnie. Druga metoda obliczeniowa opiera się na wyznaczaniu wydajności wymienników przy wykorzystaniu modelu średniej logarytmicznej różnicy temperatur stosowanej dla płytowych wymienników ciepła i możliwe są dwie ścieżki obliczeniowe. Jedna służy do wyznaczania geometrii wymiennika, a druga do analizy cieplnej wymiennika ciepła, co umożliwia wyznaczenie całkowitej powierzchni wymiany ciepła, a w konsekwencji dobór wymiennika ciepła dla wymaganej szybkości wymiany ciepła, przy czym pierwszy prosty model jest wykorzystywany do obliczenia parametrów na wylotach wymienników ciepła i oszacowania spadków ciśnienia.

Dla pozostałych dwóch elementów, pompy i zaworu dławiącego również sformułowano proste modele matematyczne. I tak ostatecznie wszystkie elementy składowe strumienicowego układu chłodniczego zostały matematycznie indywidualnie opisane i odpowiednio ze sobą połączone, co dobrze ilustruje schemat blokowy modelu systemu chłodzenia, uwzględniający możliwe konfiguracje jego struktury, przedstawiony na rys. 4.13.

Algorytm obliczeniowy został napisany w środowisku *Python*, które wykorzystuje

programowanie obiektowe, co pozwala na oddzielenie pojedynczych składowych układu chłodzenia i umożliwia szybką modyfikację każdego pojedynczego modułu, tj. modelu elementu składowego systemu niezależnie od pozostałych. Dzięki temu **został zrealizowany cel zaproponowanej metodyki obliczeniowej, który umożliwia wykorzystanie względnie prostych modeli matematycznych składowych układu chłodniczego, a następnie w miarę potrzeb szybką ich modyfikację w sposób indywidualny, niezależny od pozostałych, a pozwalający na dopasowanie całej instalacji do zadanych warunków pracy, tj. do odbioru ciepła odpadowego napędowego i zaspakajania odpowiednich potrzeb chłodniczych.**

Dane dotyczące źródła ciepła odpadowego, podobnie jak i dane chłodzonego obiektu – jego potrzeby chłodnicze, są wprowadzane jako dane wejściowe do modelu obliczeniowego. Nasuwa się po raz kolejny pytanie:

7. Czy istnieją ograniczenia co do zmienności parametrów wejściowych, ciepła odpadowego i obciążenia chłodniczego? Czy zaproponowany model uwzględnia sytuację, w którym możliwe do pozyskania ciepło odpadowe jest niewystarczające do uzyskania efektu chłodniczego w danym czasie?

Rozdział 4 jest bardzo istotny do oceny osiągnięcia naukowego Kandydata. Jak już wspomniano, opracowana szczegółowa procedura obliczeniowa strumieniowego układu chłodniczego umożliwia prowadzenie analiz w odniesieniu do indywidualnych elementów składowych układu. Możliwe jest analizowanie różnych wariantów doboru składowych elementów, co wpływa na uzyskanie współczynników COP na różnym poziomie, co skutkuje różnymi kosztami inwestycyjnymi dla całego systemu. **Opracowana procedura stanowi więc swoistą strategię racjonalnego doboru poszczególnych składowych przy możliwych różnych konfiguracjach układu chłodniczego. Można uznać, że jest ona przyczynkiem do prowadzenia bardziej zaawansowanych analiz optymalizacyjnych strumieniowego układu chłodniczego napędzanego przemysłowym ciepłem odpadowym. Opracowanie procedury wymagało dogłębnej wiedzy podstawowej, znajomości rozwiązań technologii chłodniczych w praktyce i umiejętności połączenia ich w efektywny spójny sposób w celu stworzenia narzędzia do doboru elementów składowych strumieniowych układów chłodniczych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem.**

W rozdziale 5 Kandydat przedstawił wyniki przeprowadzonych badań służących weryfikacji opracowanego i przedstawionego w rozdziale 4 modelu matematycznego strumieniowego układu chłodzenia jako całości i modeli jego elementów składowych. Przedstawione w tym rozdziale wyniki i ich analiza są istotne do oceny osiągnięcia naukowego Kandydata.

Weryfikacja opracowanych modeli matematycznych w pierwszym etapie polegała na odniesieniu się do dostępnych danych literaturowych przedstawiających wyniki badań eksperymentalnych strumienic, które zostały przeprowadzone przez innych badaczy. Dane te

dotyczyły strumienicy wyposażonych w „starsze” czynniki chłodnicze z grupy HFC (R141b i R134a). Przeprowadzona weryfikacja wskazała potrzebę kalibracji modelu w szczególności w odniesieniu do sprawności strumienicy, do czego wykorzystano opracowane wcześniej (przez prof. Smółka) oprogramowanie numeryczne (*EjectorPL*). Dane eksperymentalne literaturowe posłużyły do walidacji modelu strumienicy przy poprawionych wartościach sprawności elementów składowych i uzyskano zadowalające wyniki (w warunkach projektowych i poza-projektowych pracy układu), co dobrze obrazuje rys. 5.2.

Główne prace walidacyjne polegały na weryfikacji opracowanego modelu matematycznego układu chłodniczego i jego składowych z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych na dwóch prototypowych strumienicowych agregatach chłodniczych firmy Marani Ltd. napędzanych niskotemperaturowym przemysłowym ciepłem odpadowym o mocy 200 kW i 600 kW. Badania eksperymentalne prowadzono dla pięciu niezależnych serii pomiarowych, których metodykę i zakres opracowano wcześniej w czasie wstępnych badań testujących przygotowane stanowiska badawcze, co opisano w rozdziale 3. Prototypy urządzeń chłodniczych badane w czterech seriach pomiarowych wykorzystywały niskociśnieniowy czynnik chłodniczy nowej generacji HFO R1233zd(E) o niskim wskaźniku GWP, w piątej serii wykorzystano czynnik wysokociśnieniowy R1234zd(E). Otrzymane wyniki zostały zamieszczone w postaci tabel oraz wykresów. Została przeprowadzona szczegółowa analiza otrzymanych wyników w odniesieniu do kolejnych serii pomiarowych.

Weryfikację modeli matematycznych układów chłodniczych rozpoczęto od badań samej strumienicy jako podstawowego elementu układu. Na rysunkach 5.3 – 5.4 przedstawiono warunki brzegowe funkcjonowania strumienicy (na wykresach w układzie ciśnienie absolutne – entalpia właściwa) dla prototypu MARANI 200 (dla 3 kolejnych serii pomiarowych) i MARANI 600 (dla 2 następnych serii), odpowiednio. Zwrócono uwagę na występujące ograniczenia przy realizacji niektórych serii pomiarowych i duże spadki ciśnień. Istotną okazała się też niestabilna praca źródeł ciepła odpadowego, którym były sprężarki powietrza, co powodowało znaczną zmienność temperatury na wlocie dyszy napędowej, od 52,2 do 70,5 °C, a w konsekwencji znaczną zmienność stopnia przegrzania pary, od 1,8 K do 20,1 K. Niestabilną pracę strumienicy odnotowano również przy realizacji czwartej serii pomiarowej dla układu chłodniczego o mocy 600 kW, gdzie źródło ciepła odpadowego, którym był generator pary wykazywało się jeszcze większą niestabilnością pracy, bowiem temperatury na wlocie dyszy napędowej były w zakresie od 77,3 do 144,6 °C, a przegrzanie pary dochodziło nawet do 100 K. Aby zmniejszyć przegrzanie zmodyfikowano system źródła ciepła i zastosowano w strumienicy wspomniany wcześniej czynnik chłodniczy wysokociśnieniowy. Opisane wyniki potwierdzają znaczenie stabilnej pracy źródła ciepła odpadowego w celu zapewnienia stabilnych warunków pracy strumienicy.

Przy kalibracji modelu obliczeniowego strumienicy sprawności elementów składowych strumienicy zostały zoptymalizowane poprzez wykorzystanie różniczkowej metody optymalizacyjnej, a uzyskane wielkości sprawności zestawiono w Tabeli 5.3. Odnosząc się do

danych zamieszczonych w tej tabeli proszę wyjaśnić:

8. duże różnice pomiędzy sprawnościami izentropowymi dyszy ssącej w kilku seriach pomiarowych, a zwłaszcza w porównaniu z dwoma ostatnimi seriami, czwartą i piątą, i czym to skutkuje?

Obliczone na podstawie opracowanych modeli matematycznych charakterystyczne parametry pracy strumienicy porównano z wynikami eksperymentów uzyskanymi w trakcie kolejnych odpowiednich serii pomiarowych. Wyniki pomiarów i modele obliczeniowe pozwoliły na wykorzystanie zoptymalizowanych sprawności elementów składowych strumienicy jako składowych funkcji parametrów pracy strumienicy i całego systemu.

Wielkości podstawowych kluczowych parametrów opisujących wydajność funkcjonowania strumienicy, takie jak masowy współczynnik zasysania, współczynnik sprężu i całkowita sprawność strumienicy zostały obliczone na podstawie modeli a następnie zweryfikowane odpowiednimi badaniami eksperymentalnymi dla odpowiednich serii pomiarowych. I tak dla serii od 1 do 3 dla prototypu układu strumienicowego o mocy 200 kW, interpretacja graficzna uzyskanych wyników parametrów z modeli obliczeniowych i badań eksperymentalnych, ich względny błąd szacowania, w odniesieniu do masowego współczynnika zasysania odpowiednio ilustrują wykresy zamieszczone na rys. 5.5 – 5.7, współczynnika sprężu rys. 5.10 – 5.12, i całkowitej sprawności strumienicy rys. 5.14 – 5.16. Z kolei względne rozbieżności pomiędzy wielkościami modelowymi obliczonymi a pomiarowymi eksperymentalnymi dla prototypu o mocy 600 kW dla serii 4 i 5 odpowiednio, w odniesieniu do masowego współczynnika zasysania są na rys. 5.8 i 5.9, całkowitej sprawności strumienicy rys. 5.17 – 5.18, natomiast, dla współczynnika sprężu na rys. 5.13, ale tylko dla serii 4, stąd pytanie:

9. Dlaczego nie ma rysunku dla serii 5 pomiarowej w odniesieniu do współczynnika sprężu?

W tym miejscu można zaznaczyć, że wymienione powyżej rysunki pokazujące odchylenia pomiędzy wielkościami obliczeniowymi a eksperymentalnymi zostały umieszczone w niewłaściwych miejscach tekstu rozprawy, co utrudnia analizę i weryfikację modelu.

Porównanie kluczowych parametrów pracy strumienicy, otrzymanych z pomiarów eksperymentalnych z wynikami obliczeń odpowiednich modeli strumienicy i jej składowych, potwierdziło względnie dobrą zgodność pomiędzy nimi. Istotnym wrażliwym obliczeniowo elementem jest wielkość ciepła odpadowego i parametry go opisujące. Jak pisze Kandydat opracowany model umożliwia względnie szybkie dopasowanie (przeliczanie) strumienicy dla rozpoznanych parametrów ciepła odpadowego, np. ze stacji sprężarek powietrznych. Jest to szczególnie istotne do zapewnienia efektywnej pracy układu chłodniczego.

W dalszej części rozdziału 5 opisano walidację pięciu modeli wymienników ciepła stosowanych w strumienicowych układach chłodniczych na podstawie wyników pomiarów badań eksperymentalnych uzyskanych w trakcie odpowiednich serii pomiarowych. Można

więc ostatecznie stwierdzić, że **uzyskane wyniki wskazują, iż model strumienicy wraz z modelami płytowych wymienników ciepła został dobrze skalibrowany, wykazuje się odpowiednią dokładnością, a w konsekwencji przydatnością do celów projektowych.**

Ostatnim elementem rozdziału 5 jest walidacja modeli matematycznych składowych elementów układu chłodniczego na podstawie wyników eksperymentalnych działania dwóch prototypowych układów chłodniczych pracujących w warunkach rzeczywistych. Jest to **opis pierwszego przemysłowego wdrożenia strumienicowego układu chłodniczego. Przedstawione rozważania dokumentują efektywność i wydajność tych systemów w rzeczywistych warunkach pracy, co stanowi o dużej innowacyjności podjętych prac i ich oryginalności naukowej i wdrożeniowej.**

W przypadku rzeczywistej pracy układów chłodniczych strumienicowych istotne jest dokładne oszacowanie parametrów pracy, w tym zebranie szczegółowych danych odnośnie do napędowego ciepła odpadowego, charakterystyki chłodzonego ośrodka i jego wymagań chłodniczych, w tym temperatury i ilości odbieranego ciepła, a także warunków po stronie skraplacza. Parametry determinują funkcjonowanie strumienicy i wydajność chłodniczą układu. Przeprowadzone badania potwierdziły, jak istotne dla zapewnienia efektywnego działania strumienicowego układu chłodzenia jest wykorzystanie stabilnego (cieplnie i przepływowo) napędowego odpadowego źródła ciepła. Badania eksperymentalne były prowadzone w 5 seriach, opisanych wcześniej i potwierdziły poprzednie wyniki, w tym fakt, że nowy czynnik chłodniczy R1233zd(E) może być stosowany do chłodzenia w wysokich temperaturach. Jednakże, standardowy wysokociśnieniowy czynnik R1234ze(E) jest bardziej wskazanym rozwiązaniem przy standardowych parametrach układów chłodniczych i uzyskuje się wtedy wyższe współczynniki wydajności chłodniczej COP niż przy stosowaniu czynnika R1233zd(E), który wykazuje dużą wrażliwość na niewielkie spadki ciśnienia.

Ostatni **rozdział 6** zawiera podsumowanie wykonanych badań, zarówno modelowania matematycznego, jak i eksperymentalnych, podkreślając najistotniejsze elementy badań i główne osiągnięcia. Kandydat formułuje wnioski końcowe o charakterze ilościowym i jakościowym. Podkreśla innowacyjność przeprowadzonych badań naukowych, jak i samego wdrożenia przemysłowego. Na zakończenie przedstawia kierunki dalszych badań i dalsze możliwości rozbudowy i rozpowszechnienia opracowanej aplikacji do doboru elementów składowych strumienicowych układów chłodniczych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych.

Podsumowując należy stwierdzić, iż **Kandydat zajął się istotną problematyką badawczą, która daje mierzalne efekty aplikacyjne.** Rozdział 4 opisujący tworzenie modeli matematycznych poszczególnych elementów składowych i całego układu chłodniczego oraz rozdział 5, w którym opisana jest walidacja eksperymentalna opracowanych modeli są bardzo istotne w odniesieniu do pokazania złożoności procesu badawczego, jego rozwiązania i wdrożenia, a tym samym do zobrazowania osiągnięcia naukowego Kandydata. **Zastosowana metodyka badawcza umożliwiła odpowiednią walidację opracowanych modeli**

matematycznych, dzięki czemu została potwierdzona aplikacyjność opracowanych modeli do celów projektowych strumienicowych systemów chłodniczych wykorzystujących ciepło odpadowe z procesów przemysłowych. Przeprowadzenie szerokiego zakresu badań podstawowych modelowania matematycznego, symulacyjnych oraz eksperymentalnych, w tym weryfikacja opracowanych modeli, gwarantuje wiarygodność naukową uzyskanych wyników i sformułowanych wniosków.

Rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia zarówno badawczo – naukowego, jak i wdrożeniowego. Problem wykorzystania ciepła odpadowego jest bardzo istotnym zagadnieniem związanym z ograniczeniem energochłonności procesów przemysłowych. Zagadnienie wykorzystania ciepła odpadowego do napędu strumienicowych układów chłodzenia jest niewystarczająco opisane w literaturze i przebadane w warunkach laboratoryjnych, a tym bardziej w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Dlatego też **podjęcie przez Kandydata problematyki rozprawy uważam za bardzo celowe i świadczące o dogłębnym rozeznaniu przez Kandydata współczesnych zagadnień chłodnictwa i problematyki energooszczędności w przemyśle.**

2.3. Uwagi szczegółowe

W niniejszym punkcie zostały sformułowane bardziej szczegółowe uwagi w odniesieniu do całej rozprawy, które nie są uwagami co do jakości merytorycznej rozprawy.

W rozprawie brakuje krótkiej informacji o tym, że doktorat jest doktoratem wdrożeniowym. Informacji tej nie ma też w oficjalnej prośbie o opracowanie opinii przesłanej w liście Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej.

Rozprawa nie zawiera krótkiego opisu zrealizowanego projektu badawczo-wdrożeniowego związanego bezpośrednio z tematem pracy i roli Kandydata w tym projekcie. Praca jest napisana standardowo w trybie bezosobowym, co utrudnia przedstawienie w sposób bezpośredni dokonań własnych Kandydata w opisywanych badaniach. W celu otrzymania informacji o własnych badaniach Kandydata zwróciłam się bezpośrednio do promotorów i doktoranta o przesłanie takiej krótkiej informacji, co wyjaśniło podstawową sprawę roli i zadań Kandydata w badaniach.

W pracy występują pewne błędy redakcyjne polegające na umiejscowieniu rysunków w środku zdań, co ogranicza jasność przekazu.

Pewnym mankamentem w pracy jest przesunięcie rysunków względem ich przedstawienia i analizy w tekście, czasem o kilka stron. Dotyczy to rysunków z wynikami walidacji modeli matematycznych z danymi eksperymentalnymi, począwszy od rys. 5.9 do rys. 5.19 włącznie. Rysunki te nie dość, że zostały zamieszczone kilka stron później niż występuje do nich odwołanie w tekście, to ponad to zostały zamieszczone w rozdziałach, których tematycznie nie dotyczą.

2.4. Podsumowanie

Dzięki przesłanym elektronicznie wyjaśnieniom **należy stwierdzić wiodącą rolę Kandydata w badaniach będących przedmiotem rozprawy**. Po pierwsze **Kandydat jest autorem modeli matematycznych elementów składowych strumienicowego układu chłodniczego i tego układu jako całości**. Opracowany przez Kandydata kompleksowy model pozwala na dobór elementów składowych strumienicowego układu chłodniczego, co umożliwia projektowanie strumienicowych agregatów chłodniczych o różnych wydajnościach i pracy w różnych konfiguracjach, co stanowi istotne osiągnięcie naukowo - wdrożeniowe Kandydata. Co więcej **Kandydat przeprowadził walidację i kalibrację modelu układu strumienicowego i jego składowych prowadząc badania eksperymentalne w warunkach laboratoryjnych i w rzeczywistych warunkach w obiekcie przemysłowym**. Prowadzone badania doprowadziły Kandydata do **opracowania aplikacji do doboru elementów składowych innowacyjnych strumienicowych agregatów chłodniczych wykorzystujących ciepło odpadowe z procesów przemysłowych**, które są w komercyjnej ofercie firmy Marani Ltd., gdzie m.in. realizowane były prace badawcze w ramach przedmiotowego doktoratu wdrożeniowego Kandydata. Należy podkreślić, że Kandydat podjął się rozwiązania innowacyjnego problemu badawczego związanego ze stworzeniem aplikacji do projektowania strumienicowych układów chłodniczych, w których rozważył stosowanie czynnika wysokociśnieniowego R1234ze(E), jak i nowego czynnika przyjaznego środowisku z grupy R1233zd(E) charakteryzującego się pracą przy niskich ciśnieniach, przy czym wykazał dużą wrażliwość pracy układów chłodniczych na możliwe spadki ciśnienia w obiegu.

Podsumowując należy stwierdzić, iż **recenzowana rozprawa dokumentuje głęboką i wszechstronną wiedzę oraz ogromny wkład pracy pana mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego w opracowanie modeli matematycznych i ich weryfikację poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych, a następnie jasne i efektywne opracowanie i analizę wyników mających istotne walory zarówno naukowo - poznawcze, jak i wdrożeniowe**. Wyrażam opinię, że w świetle rozpoznanego przez Kandydata stanu wiedzy, decyzja o napisaniu niniejszej monografii i przeprowadzeniu badań była przemyślana i słuszna, cele badań zostały osiągnięte. Rozprawa dokumentuje istotne oryginalne osiągnięcie naukowe Kandydata. **Unikalność badań naukowych i prac wdrożeniowych prowadzonych przez Kandydata zasługuje na szczególne uznanie, i daje podstawę do wyróżnienia rozprawy doktorskiej**.

3. Wniosek Końcowy

Rozprawa doktorska pana mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego wnosi widoczny wkład w rozwój nauk technicznych, w szczególności badań z zakresu chłodnictwa i energetyki, w tym w ograniczenie energochłonności procesów przemysłowych. Kandydat wykazał w pracy, jak w celu osiągnięcia realizacji postawionych zadań badawczo - wdrożeniowych można efektywnie wykorzystywać i łączyć różne metody badawcze o charakterze podstawowym i aplikacyjnym. Kandydat w sposób konsekwentny i bardzo przejrzysty opisał podstawy fizyczne rozważanych zjawisk i tworzenie ich modeli

matematycznych, przyjęte metody badań eksperymentalnych w warunkach laboratoryjnych i w rzeczywistych obiektach przemysłowych, oraz eksperymentalną walidację opracowanych modeli. Pozwoliło to na odpowiednio sformułowanie wniosków o charakterze poznawczym i aplikacyjnym. **Opracowanie przez Kandydata aplikacji do doboru elementów składowych strumienicowych układów chłodniczych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych na podstawie modelu obliczeniowego i pomiarów eksperymentalnych na prototypowych agregatach chłodniczych stanowi Jego ważne osiągnięcie naukowo - badawcze o istotnym znaczeniu wdrożeniowym.**

Przeprowadzone przez Kandydata prace stanowią bardzo widoczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo, energetyka. W szczególności wnoszą one wartość dodaną w odniesieniu do badań dotyczących technik chłodniczych, w tym stosowania strumienicowych gazowych naddźwiękowych układów chłodniczych, oraz wykorzystania niskotemperaturowego ciepła odpadowego z procesów przemysłowych do napędu układów strumienicowych. Kandydat wykorzystuje różne metody badawcze, modelowania matematycznego, symulacyjne, eksperymentalne w obiektach laboratoryjnych i rzeczywistych do rozwiązania postawionego problemu, w sposób przemyślany wykazując się bardzo dużą wiedzą teoretyczną, praktyczną i intuicją badawczą. Rozprawa jest przykładem współczesnego nowatorskiego podejścia do badań naukowych, które wymagają wszechstronnej wiedzy i umiejętności kompleksowego podejścia do rozważanych problemów badawczych, a dzięki temu pozwalają na wyciągnięcie istotnych wniosków zarówno naukowych, jak i aplikacyjnych. **Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego.**

Wartość merytoryczna rozprawy i oryginalne osiągnięcia Kandydata spełniają wymagania wymienione w przepisach Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) z późniejszymi zmianami, tj. Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 marca 2023 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. 2023 poz. 742, szczególnie Dział V Stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki, Rozdział 2 Stopień doktora, Oddział 1 Nadawanie stopnia doktora, Art.187, i wobec powyższego wnoszę do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy doktorskiej „The development of the application for components selection to the ejector refrigeration systems, driven by low-grade waste heat from industrial processes, based on the mathematical model and the experiments on the prototype refrigeration aggregates” pana mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego, do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk technicznych.

Podpisała Dorota Chwieduk