

prof. dr hab. inż. Tadeusz Bohdal
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Katedra Energetyki
ul. Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 17.02.2025 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego nt.:

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

Opinia została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej prof. dr hab. Krzysztofa Labusa – Umowa o dzieło nr UMC/0208/2025 z dnia 13.01.2025 r.

Promotorami recenzowanej pracy są: prof. dr hab. inż. Jacek Smółka, prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz i promotor pomocniczy dr inż. Łukasz Antczak.

1. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa obejmuje 152 strony i została podzielona na sześć rozdziałów. Dodatkowo podano: wykaz oznaczeń i symboli, podziękowania, przedmowę, bibliografię oraz streszczenie w języku angielskim i polskim. Rozprawę napisano w języku angielskim.

W treści rozprawy zawarto:

1. **Wprowadzenie**, gdzie zwrócono uwagę na konieczność zagospodarowania ciepła odpadowego, co bezpośrednio wiąże się ze zmniejszeniem zapotrzebowania na energię pierwotną. Wskazano kierunki takich działań w zakresie ogrzewnictwa, chłodnictwa, produkcji energii elektrycznej, energetycznej gospodarki skojarzonej itp. Zaproponowano zastosowanie układów chłodniczych opartych na eżejktorze do generowania mocy chłodniczej z niskotemperaturowego ciepła odpadowego, gdzie do najważniejszych zalet zalicza się niezawodność, niskie wymagania konserwacyjne oraz niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne
2. **Krytyczny przegląd wiedzy** w zakresie rozpoznania zjawisk fizycznych zachodzących w systemach chłodniczych opartych na eżejktorach. Opisano zasadę działania i budowę strumienic oraz w zarysie historycznym wyniki badań uzyskane przez różnych autorów. Szczególną uwagę zwrócono na zjawiska fizyczne zachodzące w systemach chłodniczych

opartych na eżektorach napędzanych ciepłem odpadowym. Analizie poddano również uwarunkowania dotyczące stosowania płynów roboczych w układach chłodniczych opartych na eżektorach.

3. **Cel i zakres pracy.** Podano główne przesłanki związane z podjęciem tematu rozprawy, opisano cel oraz szczegółowo przedstawiono zakres pracy.
4. **Przedmiot badań,** gdzie opisano dwa prototypowe systemy chłodnicze oparte na eżektorach opracowane na potrzeby badań eksperymentalnych, jeden o wydajności 200 kW, a drugi o wydajności 600 kW. Szczegółowo zaprezentowano zagadnienia projektowe, konkretne komponenty systemów i wyzwania napotkane podczas budowy i testowania opracowanych systemów chłodniczych.
5. **Opis stanowisk badawczych i metodyki badań.** Szczegółowo przedstawiono koncepcję i budowę stanowisk badawczych, układy kontrolno-pomiarowe, procedury eksperymentalne i modyfikacje wprowadzone do systemów i stanowisk testowych podczas serii pomiarowych. Opisano sposób przetwarzania danych i określania niepewności pomiarów.
6. **Model matematyczny dla systemu chłodniczego opartego na eżektorach,** gdzie skupiono się na poszczególnych jego komponentach, takich jak eżektor, wymienniki ciepła (generator, podgrzewacz wstępny, parownik, skraplacz itp.), zawór rozprężny i pompa. Przedstawiono założenia do modelu, równania i algorytmy modelowania każdego komponentu, podkreślając znaczenie dokładnego oszacowania parametrów dla wiarygodnych przewidywań modelu.
7. **Wyniki własnych badań eksperymentalnych,** które przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch prototypowych systemów, skupiając się na walidacji modelu matematycznego i ocenie wydajności systemu chłodniczego opartego na eżektorze w różnych warunkach pracy. Porównano również moce chłodnicze tych systemów przy wykorzystaniu dwóch czynników: R1233zd(E) i R1234ze(E). Wzięto pod uwagę ich własności termodynamiczne i możliwość wykorzystania dla określonych parametrów chłodzenia.
8. **Podsumowanie i wnioski,** które opracowano na podstawie uzyskanych wyników prac koncepcyjnych, konstrukcyjnych i badań eksperymentalnych zaproponowanego systemu chłodniczego opartego na eżektorach. Podkreślono znaczenie wykorzystania niskotemperaturowego ciepła odpadowego do zrównoważonego chłodzenia, wykazano znaczny potencjał systemów chłodniczych opartych na eżektorze, opisano wyzwania i ograniczenia badań oraz przyszłe kierunki dalszego rozwoju i komercjalizacji tej technologii.
9. **Bibliografia** zawierająca 104 pozycje literatury w postaci artykułów naukowych i pozycji książkowych (w tym kilka opracowań, których Doktorant jest współautorem).

2. Cel i zakres pracy

Doktorant podał, że głównym celem pracy było opracowanie modelu doboru komponentów układu chłodniczego opartego na eżektorze wraz z eksperymentalną walidacją pierwszych prototypów. Zaplanowano zastosowanie niepalnych czynników chłodniczych o niskim współczynniku GWP oraz zasilanie układu ciepłem odpadowym o bardzo niskiej jakości. Zakres pracy obejmował:

1. sformułowanie modelu matematycznego 0-D obiegu chłodniczego z wykorzystaniem eżektora napędzanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym (wraz z doбором komponentów).

2. przeprowadzenie testów dwóch prototypów układów chłodniczych z wykorzystaniem eżektora, napędzanych ciepłem odpadowym o mocy cieplnej napędu 200 kW i 600 kW w rzeczywistych warunkach przemysłowych, przy użyciu nowych przyjaznych dla środowiska czynników chłodniczych z grupy HFO,
3. walidację i kalibrację modeli komponentów obiegu chłodniczego z wykorzystaniem eżektora w oparciu o wyniki eksperymentu,
4. eksperymentalne porównanie efektów zastosowania dwóch rodzajów czynników roboczych: R1233zd(E) i R1234ze(E), w urządzeniach chłodniczych dla konwencjonalnych temperatur wody chłodzonej i podwyższonych temperatur wody chłodzonej przeznaczonych do wysokotemperaturowych układów klimatyzacyjnych.

W ramach zaproponowanego zakresu działań i uzyskanych rezultatów Doktorant w pełni osiągnął cel swojej pracy.

3. Analiza treści rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań w zakresie podwyższania sprawności energetycznej maszyn i urządzeń i lepszego wykorzystania energii stosowanej do ich napędu. Malejące rezerwy paliw konwencjonalnych zmuszają nas obecnie do takiego działania. Autor rozprawy proponuje wykorzystanie w instalacjach energetycznych układów strumienicowych, to jest urządzeń, których zadaniem jest wykorzystanie energii kinetycznej czynnika napędowego do transportu czynnika roboczego w instalacji chłodniczej. Dodatkowym atutem jest wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła odpadowego generowanego jako produkt uboczny wielu procesów technologicznych. Propozycja ta jest uzasadniona ekonomicznie ponieważ takie rozwiązania mogą zastąpić konwencjonalne systemy chłodzenia, które zużywają energię elektryczną. Dokonując przeglądu literatury Doktorant wykazał, że pomimo licznych opisów, takie systemy nie znalazły do tej pory zastosowań przemysłowych. W celu wdrożenia tej technologii w przemyśle należy prowadzić dalsze badania implementacyjne, w tym obejmujące pracę strumienicowych urządzeń chłodniczych w rzeczywistych warunkach zasilania przemysłowym ciepłem odpadowym. Istnieje również potrzeba opracowania efektywnych narzędzi do projektowania omawianych urządzeń.

Mając powyższe na uwadze Doktorant podjął próbę opracowania i walidacji kompleksowego modelu matematycznego dla strumienicowego układu chłodniczego, w szczególności koncentrując się na projektowaniu i doborze komponentów do uzyskania bardziej wydajnej pracy. W rozdziale drugim szczegółowo opisał przedmiot badań w postaci dwóch prototypowych systemów chłodniczych opartych na eżektorach, które zostały opracowane na potrzeby badań, jeden o wydajności 200 kW, a drugi o wydajności 600 kW. Szczegółowo zaprezentował zagadnienia projektowe, konkretne komponenty systemów i wyzwania napotkane podczas budowy i testowania opracowanych systemów chłodniczych.

W rozdziale trzecim opisano stanowiska badawcze i metodykę badań. Szczegółowo przedstawiono koncepcję i budowę stanowisk badawczych, układy kontrolno-pomiarowe, procedury eksperymentalne i modyfikacje wprowadzone do systemów i stanowisk testowych podczas serii pomiarowych. Opisano sposób przetwarzania danych i określenia niepewności pomiarów.

W rozdziale czwartym opisano prace, które obejmowały opracowanie modeli 0-D strumienicy i modeli płytowych wymienników ciepła z uwzględnieniem kluczowych parametrów, takich jak: parametry geometryczne, właściwości płynu itp. Zaproponowany model iteracyjny służy do analizy termodynamicznej systemu chłodniczego opartego na eżektorze, ze szczególnym uwzględnieniem projektowania agregatów chłodniczych o różnych wydajnościach i zakresie konfiguracji w oparciu o dwa testowane systemy chłodnicze. Model ten, zbudowany z modeli poszczególnych komponentów, charakteryzuje się algorytmem matematycznym, który obejmuje modele standardowych komponentów systemu chłodniczego, tj. zaworu rozprężnego, parownika i skraplacza, oraz urządzeń niestandardowych, tj. eżektora naddźwiękowego, pompy obiegowej i generatora. Model systemu obejmuje również symulację dodatkowego wymiennika ciepła - rekuperatora oraz możliwość modelowania rozdzielania wymienników ciepła służących do dostarczania ciepła odpadowego do generatora i podgrzewacza.

W rozdziale piątym podano, że opracowany model obiegu chłodniczego został przetestowany i zweryfikowany w oparciu o dane eksperymentalne z dwóch prototypowych systemów napędzanych ciepłem odpadowym o mocy 200 kW i 600 kW, zbudowanych i przetestowanych w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Prototypy te wykorzystywały niskociśnieniowy czynnik chłodniczy HFO R1233zd(E) o niskim GWP do odzyskiwania ciepła odpadowego. Przeprowadzone badania wskazały na możliwą wydajną pracę strumienicowych układów chłodniczych, wykorzystujących ten przyjazny dla środowiska czynnik chłodniczy, zwłaszcza do chłodzenia wysokotemperaturowego.

W podsumowaniu (rozdział szósty) stwierdzono, że dobrze skalibrowany model strumienicy wraz z modelami płytowych wymienników ciepła, które są najważniejszymi komponentami strumienicowego układu chłodzenia, potwierdził swoją dokładność i przydatność do celów projektowych. Charakterystyczne sprawności komponentów strumienicy zostały zoptymalizowane dla modelu obliczeniowego, a kluczowe parametry wydajności strumienicy zostały oszacowane z dużą dokładnością. Stwierdzono, że dokładność modelu strumienicy jest bardzo wrażliwa na prawidłowe oszacowanie sprawności komory mieszania strumienicy. Układ chłodniczy pracujący z czynnikiem R1233zd(E) został również porównany z wysokociśnieniowym czynnikiem R1234ze(E). Zadowalająca wydajność układu chłodniczego wykorzystującego R1233zd(E) została potwierdzona dla wysokotemperaturowych warunków chłodzenia, gdzie współczynnik COP wynosił 0,25 przy krytycznych parametrach roboczych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań teoretycznych i eksperymentalnych zostały opracowane wnioski, które potwierdzają słuszność zastosowanych nowych rozwiązań konstrukcyjnych związanych z wykorzystaniem eżektora napędzanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym.

4. Oryginalność i wartości poznawcze pracy

Zaproponowany przez Doktoranta temat rozprawy doktorskiej wynika z potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie podnoszenia sprawności maszyn i urządzeń energetycznych oraz lepszego wykorzystania energii stosowanej do ich napędu. W przedmiotowym przypadku dotyczy to chłodniczych urządzeń strumienicowych napędzanych ciepłem odpadowym. Pomimo licznych publikacji w tym zakresie problematyka ta nie została jeszcze w pełni zbadać i opisana. Istnieje dalsza potrzeba prowadzenia prac badawczych. Wynika to z konieczności poprawy konstrukcji i lepszego wykorzystania tych urządzeń w licznych zastosowaniach praktycznych. Pozwoli to na osiągnięcie efektu synergii i wzrostu współczynników sprawności i efektywności działania. Doktorant podał cel i zakres swojej rozprawy, co pozwoliło uzyskać wymierne osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- a) **dokonanie krytycznego przeglądu dostępnej literatury** w zakresie tematu rozprawy. Na tej podstawie stwierdzono, że chociaż koncepcja systemu chłodniczego opartego na ezektorach napędzanego ciepłem odpadowym jest szeroko prezentowana w literaturze, to takie systemy nie znalazły do tej pory szerszych zastosowań przemysłowych. W celu wdrożenia tej technologii w przemyśle należy prowadzić dalsze badania, w tym obejmujące pracę strumienicowych urządzeń chłodniczych w rzeczywistych warunkach zasilania przemysłowym ciepłem odpadowym;
- b) **opracowanie dwóch systemów chłodzenia ezektorowego napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym** o temperaturach 85°C i niższych. Doktorant opracował koncepcję działania, zaprojektował i wykonał dwie instalacje chłodnicze w pełnej skali przemysłowej o mocy cieplnej napędu 200 kW i 600 kW;
- c) **zaproponowanie oryginalnej koncepcji i wykonanie stanowisk badawczych** umożliwiających przeprowadzenie szczegółowych pomiarów cieplno-przepływowych dwóch systemów chłodzenia ezektorowego o różnej mocy napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym;
- d) **opracowanie i wykonanie układu akwizycji danych pomiarów**, a w szczególności rejestracji parametrów cieplno-przepływowych przepływu dwufazowego. Również szczegółowo opisano sposób przetwarzania danych i określania niepewności pomiarów;
- e) **przeprowadzenie testów zaproponowanych prototypów** układów chłodniczych z wykorzystaniem ezektora, napędzanych ciepłem odpadowym w rzeczywistych warunkach przemysłowych przy użyciu nowych przyjaznych dla środowiska czynników chłodniczych HFO. Przeprowadzone badania wskazały na możliwą wydajną pracę strumienicowych układów chłodniczych, wykorzystujących czynnik chłodniczy R1233zd(E), zwłaszcza do chłodzenia wysokotemperaturowego;
- f) **sformułowanie modelu matematycznego** doboru komponentów cyklu chłodniczego ezektora napędzanego niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z modelem obliczeniowym ezektora 0-D. Należy podkreślić, że opracowano dobrze skalibrowany model strumienicy wraz z modelami płytowych wymienników ciepła, które są najważniejszymi komponentami strumienicowego układu chłodzenia. Charakterystyczne sprawności komponentów strumienicy zostały zoptymalizowane dla modelu obliczeniowego, a kluczowe parametry wydajności strumienicy zostały oszacowane z dużą dokładnością. Jednak dokładność obliczeniowa modelu strumienicy jest bardzo wrażliwa na prawidłowe oszacowanie sprawności komory mieszania strumienicy;
- g) **przeprowadzenie walidacji i kalibracji modeli komponentów** cyklu chłodniczego ezektora w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Zaproponowane modele zostały przetestowane i zweryfikowane w oparciu o dane eksperymentalne dotyczące badań dwóch prototypowych systemów napędzanych ciepłem odpadowym o mocy 200 kW i 600 kW;
- h) **eksperymentalne porównanie możliwości wykorzystania** dwóch rodzajów czynników chłodniczych: R1233zd(E) i R1234ze(E) w urządzeniach chłodniczych dla konwencjonalnych temperatur wody chłodzonej i podwyższonych temperatur wody chłodzonej przeznaczonych do wysokotemperaturowych układów klimatyzacyjnych. Stwierdzono, że zastosowanie rekuperacji w układach chłodniczych z czynnikami R1233ze(E) i R1234ze(E) jest racjonalne z punktu widzenia termodynamiki, ponieważ powoduje wzrost współczynnika COP i zmniejsza zapotrzebowanie na ciepło napędowe;
- i) **opracowanie kompleksowej procedury projektowania** całego systemu chłodzenia ezektorowego, która została sprawdzona w pełnej skali przemysłowej, Uzyskane wyniki

pomiarów i obliczeń według modelu teoretycznego pozwoliły na opracowanie mapy sprawności komponentów jako funkcji parametrów pracy eżektora lub całego układu. Wykazano wystarczającą wszechstronność modelu dla celów projektowych;

- j) **określenie wartości sprawności naddźwiękowych komponentów eżektora** dla nowej generacji płynów roboczych. Wykonano obliczenia numeryczne eżektorów naddźwiękowych, pozwalające na opracowanie ich parametrów geometrycznych oraz obliczenia cieplno-płynowe całych prototypowych układów chłodniczych. Kluczowym elementem zaproponowanego układu chłodniczego był naddźwiękowy eżektor, który działa jak sprężarka w konwencjonalnym układzie chłodniczym i służy do podwyższania ciśnienia czynnika chłodniczego z ciśnienia parowania do ciśnienia skraplania. Stwierdzono, że jego prawidłowa konstrukcja decyduje o wydajności całego układu chłodniczego. Ponadto w wyniku przejścia z przepływu naddźwiękowego na poddźwiękowy w komorze mieszającej powstaje zjawisko fali uderzeniowej, w którym następuje wzrost ciśnienia statycznego i spadek prędkości, co jest kontynuowane w dyfuzorze ze względu na wzrost pola przekroju poprzecznego kanału.

Reasumując należy stwierdzić, że Doktorant opracował oryginalne i wartościowe rozwiązania koncepcyjne pozwalające na wzrost sprawności i efektywności energetycznej urządzeń wykorzystujących niskotemperaturowe ciepło odpadowe. Uzyskane wyniki przeprowadzonych prac koncepcyjnych, badań eksperymentalnych, analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu.

5. Wartości użytkowe pracy

Prezentowana rozprawa doktorska ma duże znaczenie aplikacyjne. Dotyczy ona bardzo istotnego problemu lepszego wykorzystania urządzeń w postaci strumienic napędzanych ciepłem odpadowym. Ciągły wzrost cen surowców energetycznych oraz malejące zasoby konwencjonalnych źródeł ciepła wymuszają konieczność poszukiwania nowych rozwiązań o wyższej sprawności i efektywności pracy. Zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie w postaci strumienicy naddźwiękowej wykorzystuje ciepłą energię odpadową do zasysania i sprężania czynnika chłodniczego. Takie rozwiązanie ma swoje zalety i wady. Zaletą jest brak elementów ruchomych, co praktycznie gwarantuje dużą trwałość i niezawodność oraz eliminuje możliwość wystąpienia awarii. Wadą jest niska sprawność i efektywność pracy. Dlatego ważnym jest prowadzenie prac badawczych nad podniesieniem tych wielkości. Z praktycznego punktu widzenia ważnym jest zaproponowane przez Doktoranta wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła odpadowego do napędu tych urządzeń. Jest to bardzo istotne, ponieważ ciepło niskotemperaturowe jest niskiej wartości i praktycznie jest wykorzystywane tylko w celach grzewczych. Propozycja Doktoranta jest bardzo cenna, ponieważ ciepło odpadowe może być wykorzystane do wykonania pracy związanej z przetłaczaniem i sprężaniem czynnika chłodniczego. Podnosi to jakość tej energii cieplnej, która w wielu przypadkach jest rozpraszana do otoczenia i tracona bezpowrotnie. Takie rozwiązanie w pełni kompensuje małą sprawność urządzeń strumienicowych, która w badanym przypadku wynosiła około 25%.

W wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych Doktorant zaproponował innowacyjną technologię układów chłodzenia eżektorowego napędzanych ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych. Ponadto istotną cechą opracowanej technologii było zastosowanie czynnika roboczego w pełni spełniającego restrykcyjne wymagania prawne dotyczące tzw. F-gazów. Nowa technologia umożliwia wykorzystanie ciepła odpadowego z procesów przemysłowych o temperaturach poniżej zakresu dostępnego dla konkuren-

cyjnych technologii absorpcji i adsorpcji, tj. temperatur ciepła napędowego poniżej 85°C z możliwością wykorzystania źródeł ciepła napędowego o temperaturach nawet poniżej 70°C .

Zaproponowane rozwiązania umożliwiają osiągnięcie zarówno temperatur wody schłodzonej dedykowanych standardowym parametrom pracy agregatów klimatyzacyjnych, jak i układów chłodzenia w procesach technologicznych. Konfiguracje nowych rozwiązań opracowano w celu dopasowania ich do wymagań eksploatacyjnych układów prototypowych w warunkach zastosowań przemysłowych. Podano również zasady sterowania pracą opracowanych prototypowych układów chłodniczych.

Doktorant brał również udział w opracowaniu dokumentacji prototypów, która jest zgodna z dyrektywą europejską dotyczącą urządzeń ciśnieniowych i umożliwiającą firmie MARANI nadawanie znaku CE na swoje produkty. Również z udziałem Doktoranta złożono dwa wnioski patentowe, które dotyczyły kolektora w postaci trzech eżektorów R1233zd(E) pracujących równolegle oraz konfiguracji układu chłodniczego z rozdzieleniem wymienników ciepła odprowadzających ciepło odpadowe do generatora i podgrzewacza. O dużej aplikacyjności przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej świadczy fakt, że została ona zrealizowana w ramach projektu NCBiR finansowanego przez Unię Europejską w ramach poddziałania „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”.

Prezentowana rozprawa jest istotnym wkładem Autora w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań i ich wdrożenia do projektowania i eksploatacji urządzeń wykorzystujących energię kinetyczną strumienia płynu. Poprawa ich sprawności i efektywności pracy z pewnością przyczyni się do wzrostu ich wykorzystania i zastosowań praktycznych. Jest to szeroko pojęte działanie zmierzające do racjonalnego gospodarowania energią pierwotną i odpadową, racjonalnym gospodarowaniem i zwiększeniem jej oszczędności.

6. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Uwagi o charakterze merytorycznym

1. Doktorant zaprojektował dwie instancje strumienicowe, w tym dysze napędowe. Obliczenia były wykonywane z wykorzystaniem modelu iteracyjnego. Nie podał jednak czym się kierował ustalając wstępnie poszczególne wymiary geometryczne strumienicy i dysz napędowych. Czy zostały one ustalone a priori, czy może prowadzono jakieś proste obliczenia optymalizacyjne? Należy to wyjaśnić.
2. Na stronie 15 podano: „*Aby system o mocy 600 kW osiągnął wymagane parametry, wymagany był układ trzech równoległych eżektorów...*”. Należy tutaj zapytać, dlaczego nie można było zbudować jednego większego eżektora, czy były to przesłanki konstrukcyjne, a może to wynikało ze specyfiki zjawiska i wielkości parametrów cieplno-przepływowych instalacji?
3. Przedstawiony model doboru komponentów do układów chłodzenia eżektorowego zasilanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych był wielokrotnie weryfikowany w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Doktorant równolegle prowadził obliczenia teoretyczne i badania eksperymentalne. Takie działanie pozwalało na bieżącą modernizację konstrukcji i parametrów pracy instalacji chłodniczej. Ostatecznie otrzymano względnie wysoki współczynnik COP równy 0,25. Nie podano jednak, jak należy postępować projektując chłodniczą instancję strumieniową nie mając możliwości eksperymentalnej weryfikacji jej działania?
4. Jakie wskazówki praktyczne ma Doktorant dla projektantów chłodniczych instalacji strumieniowych napędzanych niskotemperaturowym ciepłem odpadowym.

5. Doktorant prowadził badania wykorzystując dwa czynniki chłodnicze. Jeden był nisko-, a drugi wysokociśnieniowy. Jak udało się pogodzić odmienne parametry pracy instalacji chłodniczej przy użyciu tych dwóch czynników. Czy w uogólnionym modelu teoretycznym nie warto zastosować jako jeden z parametrów ciśnienie zredukowane, które zazwyczaj dobrze sprawdza się w opisie zjawisk ciepłno-przepływowych przy zastosowaniu różnych czynników roboczych?
6. W rozprawie zapisano, że na sprawność strumienicy ma duży wpływ wielkość parametru geometrycznego w postaci odległości dyszy napędowej od komory mieszania. Doktorat określił wartość tego parametru w oparciu o zaproponowany model obliczeniowy. W pracy zabrakło jednak praktycznych informacji, czy można prawidłowo dobrać tę wartość bez korzystania z zaproponowanego modelu. Czy Doktorant jest w stanie podać uproszczoną zależność obliczeniową dla projektantów?
7. Autor używa pojęć: „punkt krytyczny - critical point” i „punkt pracy – operating point”. Co oznaczają te dwa pojęcia w stosunku do strumienicy naddźwiękowej?

7. Uwagi końcowe

Prezentowana rozprawa doktorska napisana jest rzeczowo i w sposób zrozumiały. Należy podkreślić wysoki poziom przygotowania rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę wysoka jakość opracowania całego maszynopisu. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i powinny być inspiracją dla Doktoranta do dalszych analiz teoretycznych i badań eksperymentalnych dotyczących nowych rozwiązań w zakresie chłodniczych urządzeń strumienicowych. Uwagi te nie pomniejszają wartości opiniowanej pracy, którą oceniam bardzo pozytywnie.

8. Wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest wartościową pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu właściwych metod naukowych. Wykazał także umiejętności wykorzystania istniejącej wiedzy z zakresu zjawisk ciepłno-przepływowych w prowadzeniu analiz teoretycznych, badań eksperymentalnych i opracowania uzyskanych wyników. Obok odpowiedniego poziomu naukowego rozprawy, należy podkreślić duży stopień jej aplikacyjności. Praca została dofinansowana przez Ministerstwo Edukacji i Nauki (MEiN) w ramach grantu nr DWD/3/7/2019-RJO15/SDW/001-35/001-2019/20. Ponadto zrealizowane prace były bezpośrednio związane z tematyką projektu nr POIR.01.01.01-00-0301/18, pt. *„Opracowanie dwóch prototypów układów chłodniczych wykorzystujących ciepło odpadowe o mocy cieplnej napędowej 600 kW i 200 kW dostosowanych do temperatury wody lodowej i chłodzenia wysokotemperaturowego”* w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020, Oś priorytetowa I: „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa”, Działanie 1.1 „Projekty B+R przedsiębiorstw”, Poddziałanie 1.1.1 „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”. Projekt został sfinansowany przez Unię Europejską w ramach jego realizacji przez firmę MARANI Sp. z o.o. we współpracy z Politechniką Białostocką. W treści rozprawy Doktorant wskazał przykłady możliwych zastosowań proponowanych rozwiązań. Należy podkreślić, że uzyskane wyniki badań umożliwiły dokonanie dwóch zgłoszeń w Urzędzie Patentowym wynalazków, których współautorem jest Autor niniejszej rozprawy.

Dotyczyły one kolektora trzech ezektorów R1233zd(E) pracujących równolegle oraz konfiguracji układu chłodniczego z rozdzieleniem wymienników ciepła odprowadzających ciepło odpadowe do generatora i podgrzewacza.

Oznacza to, że prezentowana rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane doktoratom wdrożeniowym. Wnioskuje o przyjęcie pracy mgr inż. Mikołaja Mastrowskiego, jako rozprawy doktorskiej odpowiadającej warunkom określonym w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz.U. z 2022 r., poz. 574) i o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto **zgłaszam propozycję wyróżnienia niniejszej rozprawy**, jeżeli pozwalają na to przepisy obowiązujące w Politechnice Śląskiej. Praca ta stanowi znaczące osiągnięcie Autora i jest istotnym wkładem do poszukiwania nowatorskich rozwiązań w zakresie maszyn i urządzeń energetycznych. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz i przedstawione wnioski przyczyniają się znacznie do wzrostu stanu wiedzy w zakresie realizowanego tematu. Oryginalność i istotność zaproponowanego rozwiązania problemu naukowego, znacznie przewyższają wymagania niezbędne do obrony pracy doktorskiej.

Podpisał Tadeusz Bohdal