

Dr hab. inż. Sabina Rosiek-Pawłowska, prof. uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Termodynamiki i Odnawialnych Źródeł Energii

Wrocław, 06.02.2026

RECENZJA
pracy doktorskiej

"COMPREHENSIVE SYSTEM AND NUMERICAL ANALYSIS OF A SMALL-SCALE EJECTOR-BASED
NATURAL REFRIGERATION SYSTEM"

[„KOMPLEKSOWA ANALIZA SYSTEMOWA I NUMERYCZNA MAŁEJ SKALI NATURALNEGO SYSTEMU
CHŁODNICZEGO OPARTEGO NA EŻEKTORZE”]

autorstwa mgr inż. Rafała Fingasa

1. Podstawa formalna recenzji

Recenzja została zlecona przez prof. Krzysztofa Labusa, przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej, w drodze formalnego zawiadomienia (RIE-BD.512.1.202) z dnia 15 stycznia 2026 r. Rozprawa doktorska została napisana przez mgr inż. Rafała Fingasa pod kierunkiem prof. Giorgio Besagniego z Wydziału Energetyki Politechniki Mediolańskiej (Włochy) oraz prof. Jacka Smółki i dr Michała Haidy z Katedry Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej (Polska).

2. Ogólna charakterystyka treści rozprawy

Rozprawa doktorska liczy 232 strony i składa się z 7 rozdziałów. Część zasadniczą poprzedza streszczenie w języku angielskim, włoskim i polskim, a po niej następuje spis treści, skróty, wnioski końcowe, dalsze badania i bibliografia. Bibliografia zawiera 150 pozycji.

Wprowadzenie na początku pracy stanowi solidną podstawę do dalszej dyskusji. Rozdział ten poświęcony jest omówieniu aktualnego stanu wiedzy na temat technologii chłodniczych wykorzystujących energię ciepłą do odzyskiwania ciepła odpadowego w przemyśle oraz najnowszych osiągnięć w dziedzinie eżektorowych systemów chłodniczych (ERS). Doktorant wybrał te obiecujące alternatywne systemy chłodnicze do swojej pracy doktorskiej, ponieważ oferują one szczególne zalety ze względu na prostą konstrukcję mechaniczną i kompatybilność z naturalnymi czynnikami chłodniczymi. Ponieważ wydajność ERS jest w dużym stopniu uzależniona od właściwości termofizycznych płynu roboczego, szczegółowo przedstawiono najnowszą wiedzę naukową dotyczącą zastosowania naturalnych czynników chłodniczych stosowanych w tego typu systemach. Doktorant przedstawił liczne, dobrze udokumentowane przykłady z literatury, aby zilustrować wydajność i skuteczność systemu ERS, które zostały przeanalizowane numerycznie i eksperymentalnie. Zwrócono uwagę, że ze względu na swoją prostotę, niskie wymagania konserwacyjne i możliwość stosowania czynników chłodniczych o niskim GWP, systemy chłodnicze tego typu stanowią atrakcyjne, zrównoważone rozwiązanie dla sektora przemysłowego. Eżektory o stałej geometrii często działają daleko od punktu projektowego, co prowadzi do nieoptymalnych współczynników eżekcji i zmniejszonego współczynnika COP. Eżektor o zmiennej geometrii stanowi obiecujące rozwiązanie, które zapewnia większą elastyczność cyklu strumienicy i ogólną poprawę wydajności. Przedstawiona tutaj praca doktorska zajmuje się ograniczeniami eżektorów o stałej geometrii poprzez badanie wprowadzenia iglicy do dyszy napędowej VGE, co umożliwia dynamiczne dostosowanie się do zmieniających się warunków pracy poprzez regulację w czasie rzeczywistym współczynników powierzchni dyszy, podkreślając w ten sposób jego przydatność.

W rozdziale „Wprowadzenie” podkreślono największe wyzwania i luki w wiedzy związane z wydajnością eżektora, która jest dokładnie oceniana w różnych warunkach pracy i różnych warunkach klimatycznych, oraz wskazano na potrzebę opracowania optymalnego systemu sterowania regulacją iglicy, ponieważ jest to podstawowy mechanizm modulacji wydajności eżektora w czasie rzeczywistym, a tym samym jedno z głównych zagadnień badawczych poruszonych w niniejszym opracowaniu.

Moim zdaniem „Wprowadzenie” zostało napisane w bardzo profesjonalny sposób. Zawiera wiele przykładów najważniejszych osiągnięć w dziedzinie technologii chłodnictwa termicznego, przedstawiając zalety i wady stosowania każdej z omawianych technologii. Podkreśla on rozległą wiedzę i orientację doktoranta w jego dziedzinie badań. Podsumowując tę część rozprawy, można stwierdzić, że doktorant w jasny sposób przedstawił cztery częściowe cele swojej rozprawy doktorskiej, z których trzy dotyczą analizy numerycznej, a jeden dotyczy opracowania, wdrożenia i przetestowania (w rzeczywistych warunkach laboratoryjnych) systemu R290 ERS wyposażonego w VGE i napędzanego rzeczywistym źródłem ciepła odpadowego o niskiej temperaturze.

W kolejnej części rozprawy pan Fingas przedstawił i omówił wyniki swoich badań. Część ta podzielona jest na sześć rozdziałów:

Rozdział 2 przedstawia projekt sterowanego eżektora R290 o zmiennej geometrii. Bardzo interesujące wyniki uzyskano w wyniku owocnej współpracy z międzynarodową grupą z Politecnica di Milano, która specjalizuje się w analizie i modelowaniu zrównoważonych systemów energetycznych (prof. Fabio Inzoli i prof. Giorgio Besagni). W wyniku tej

współpracy, w ramach umowy o wspólnym promotorstwie zawartej między Politechniką Śląską a Politecnica di Milano, uzyskano szereg bardzo interesujących analiz numerycznych i wyników eksperymentalnych, obejmujących zarówno analizy z wykorzystaniem symulacji CFD, przeprowadzone na eżektorze VGE opartym na igle grupy prof. Besagniego, następnie wybór R290 jako płynu roboczego, jak i późniejsze badania eksperymentalne przeprowadzone na Politechnice Śląskiej w celu oceny wydajności wyprodukowanego VGE przy użyciu R290 jako płynu roboczego, oceniając modulujący wpływ pozycjonowania iglicy regulacyjnej na wydajność eżektora w czasie rzeczywistym, co jest przedmiotem następnego rozdziału.

W rozdziale 3 przedstawiono konfigurację eksperymentalną, metodologię i analizę eżektora o zmiennej geometrii R290 z regulowaną iglicą, w którym doktorant definiuje system pomiarowy, oprzyrządowanie i procedurę testową zastosowaną w niniejszym badaniu. Istniejąca literatura promotorów doktoratu została owocnie wykorzystana do wyboru metod i eksperymentalnego stanowiska badawczego zastosowanego w niniejszym badaniu. Skuteczne i kontrolowane badania eksperymentalne tego VGE przeprowadzono na oddzielnym stanowisku badawczym podłączonym do systemu pomp grzewczych, zapewniając warunki pracy dla wyprodukowanego eżektora, co stanowiło poważne wyzwanie eksperymentalne, biorąc pod uwagę ograniczenia narzucone przez laboratoryjną instalację testową zaprojektowaną do zastosowań z naturalnymi czynnikami chłodniczymi pod wysokim ciśnieniem, która nie była dostosowana do ERS, ale skonfigurowana jako elastyczna platforma do samodzielnego testowania eżektorów (w porównaniu z oryginalną instalacją zaprojektowaną i opisaną w analizie CFD grupy prof. Besagniego). Wyniki eksperymentów przedstawione w niniejszym rozdziale potwierdzają, że iglica ma znaczący wpływ na charakterystykę porywania masy przez eżektor. Wyższe wartości iglicy zwiększały współczynniki eżekcji w identycznych warunkach ciśnienia napędowego, wykazując skuteczną kontrolę wydajności poprzez zmiany współczynnika powierzchni dyszy napędowej. Możliwość regulacji efektywnej powierzchni gardzieli za pomocą iglicy umożliwia optymalizację wydajności w zmiennych warunkach podnoszenia ciśnienia, pozwalając w ten sposób eżektorowi na pracę bliższą punktowi projektowemu. Potwierdza to potencjał VGE jako dynamicznego i wydajnego elementu w systemach chłodniczych pracujących przy zmiennych obciążeniach termicznych. Było to niewątpliwie ambitne zadanie badawcze i można powiedzieć, że uzyskanie pozytywnych wyników wymagało nie tylko biegłości eksperymentalnej, ale przede wszystkim umiejętności analizy zdolności eżektora do kontroli wydajności, co wiązało się ze szczegółowym zbadaniem eksperymentalnie określonych krzywych wydajności eżektora i analizą rozkładu ciśnienia statycznego w eżektorze. Ta staranna praca dostarczyła informacji na temat wewnętrznej dynamiki przepływu i zachowania fali uderzeniowej pod wpływem położenia iglicy.

W rozdziale 4 przedstawiono opracowanie modeli o zmniejszonym rzędzie (ROM) R290 VGE opartych na CFD. Modele ROM zostały opracowane przy użyciu techniki POD w połączeniu z interpolacją RBF w oparciu o dane wygenerowane wyłącznie przez model CFD. Do modelowania o zmniejszonym rzędzie przyjęto czysto numeryczne podejście oparte na zaawansowanym modelowaniu HEM VGE, zapewniając działanie eżektora w pożądanym zakresie roboczym. W tym rozdziale doktorant wskazał, że modele ROM zostały uzupełnione o nowatorską, bardziej uniwersalną strukturę opartą na parametrach wydajności eżektora, które miały różne zestawy danych wejściowych i wyjściowych. W niniejszej pracy doktorskiej przeanalizowano dwa odrębne podejścia do modelowania o zmniejszonym rzędzie. Pierwszy model wykorzystywał konwencjonalne podejście dotyczące typowych zmiennych termodynamicznych jako danych wejściowych, a mianowicie ciśnienia i entalpii właściwej na dyszach wlotowych eżektora oraz ciśnienia na wylocie dyfuzora. Jako dane wyjściowe model ROM przewidywał masowe natężenia przepływu napędowego i ssącego dla danego punktu pracy w zakresie roboczym eżektora. W drugim podejściu model ROM Universal Low-Pressure Fluids VGE (ULF-VGE ROM) opierał się na ogólnej koncepcji mającej na celu poprawę elastyczności modelowania eżektorów i możliwości przenoszenia między różnymi czynnikami chłodniczymi o podobnych właściwościach termofizycznych, głównie pod względem ich działania pod ciśnieniem w podkrytycznym układzie chłodniczym. Aby zapewnić wysoką dokładność modelu ROM w oparciu o wyniki CFD, przeprowadzono kalibrację modelu w celu określenia wymaganej rozdzielczości mapy punktów CFD dla określonych zakresów roboczych w każdym porcie eżektora, potwierdzając, że dane wejściowe CFD o wysokiej rozdzielczości są kluczowe dla precyzyjnego działania modelu ROM, zwłaszcza w celu odwzorowania masowego natężenia przepływu ssania i charakterystyki porywania. W niniejszym rozdziale doktorant przedstawił również wynikowy zakres roboczy opracowanych modeli ROM oraz ich wdrożenie w oprogramowaniu Dymola, co pozwoliło uzyskać bardzo szybki model do symulacji dynamicznych.

W rozdziale 5 przedstawiono opracowanie dynamicznego modelu numerycznego systemu R290 ERS wyposażonego w model VGE o zmniejszonym rzędzie, wykorzystujący wysoce dokładne podejście do modelowania eżektorów, które umożliwia ocenę wydajności systemu w różnych warunkach temperatury otoczenia na podstawie danych historycznych. Aby ocenić wydajność proponowanego systemu chłodniczego opartego na VGE w różnych warunkach otoczenia, opracowano dynamiczny model obiektowy ERS przy użyciu oprogramowania symulacyjnego Dymola, opartego na języku modelowania Modelica, który nadaje się do symulacji złożonych systemów inżynierskich. W związku z tym w rozdziale przedstawiono schemat układu zbudowany w oprogramowaniu Dymola, opisano matematyczne sformułowanie wszystkich elementów systemu, wybrany solver i jego ustawienia, mechanizm sterowania eżektorem oraz symulowane warunki pracy układu ERS, przedstawiające jego działanie w trzech różnych strefach

klimatycznych. System ERS oparty na VGE wykazał największe korzyści w gorącym klimacie o dużej zmienności temperatury w ciągu dnia, gdzie sterowanie iglicą zapewnia ciągłą pracę w warunkach projektowych.

W rozdziale 6 przeanalizowano wydajność systemu ERS R290 w zmiennych warunkach temperatury otoczenia i przy użyciu różnych źródeł ciepła odpadowego. Aby ocenić wydajność i reakcję sterowania systemu ERS R290 w realistycznych scenariuszach eksploatacyjnych, dane dotyczące temperatury źródła pochodziły z rzeczywistych danych dotyczących ciepła odpadowego z trzech różnych zakładów przemysłowych: kopalni, kuźni i fabryki łożysk. Wyniki dają wgląd w działanie systemu w różnych scenariuszach środowiskowych i przemysłowych, koncentrując się na ocenie najlepszego zastosowania proponowanego systemu R290 ERS. Wyniki pokazują, że wydajność systemu jest bardzo wrażliwa zarówno na temperaturę otoczenia, jak i stabilność źródła. Działanie ERS w chłodniejszym klimacie charakteryzowało się wyższym współczynnikiem COP i zmniejszonym poborem ciepła przez generator, natomiast stabilne źródła ciepła odpadowego poprawiały ogólną skuteczność sterowania i wydajność energetyczną we wszystkich przypadkach.

W rozdziale 7 oceniono zastosowanie systemu ERS z wykorzystaniem alternatywnych naturalnych czynników chłodniczych (i wybranych mieszanek) przy użyciu uogólnionego podejścia do ROM. Opisano w nim badanie innych czynników chłodniczych podobnych do R290 w wybranych referencyjnych warunkach pracy. Wyniki wykazały, że system ERS z R1270 wykorzystujący R290 VGE zapewniał nawet o 21% wyższą wydajność chłodniczą i 10% poprawę współczynnika COP w porównaniu z systemem wykorzystującym R290, podczas gdy inne mieszanki na bazie R290 wykazywały porównywalną lub niższą wydajność, co wskazuje na potrzebę rozszerzenia zakresu operacyjnego ROM lub przeprojektowania eżektora dla innych czynników chłodniczych.

Rozdział 8. Sekcja wniosków – w której jasno przedstawiono główne wnioski uzyskane z przeprowadzonych badań. Głównym osiągnięciem było opracowanie uogólnionego modelu ROM ULF-VGE, wykorzystującego stosunki ciśnień i temperatury wlotowe jako dane wejściowe w celu wyznaczenia charakterystyki eżektora o zmiennej geometrii wyrażonej poprzez stosunek współczynnika eżekcji. Model R290 VGE można potencjalnie rozszerzyć na inne czynniki chłodnicze o podobnych właściwościach bez konieczności przebudowy geometrii eżektora. Zalecenia dotyczące dalszych badań – w tej sekcji przedstawiono, w jaki sposób można przeprowadzić przyszłe badania, łącząc moduły wieloeżektorowe oparte na FGE z VGE, zapewniając płynną i szybką modulację. Może to być szczególnie korzystne dla obiektów przemysłowych o wyraźnej dynamice termicznej, gdzie połączenie dwóch typów eżektorów może zapewnić stabilną wydajność chłodniczą niezależną od zmiennego źródła ciepła. W związku z tym zwiększenie skali małego systemu chłodzenia naturalnego opartego na eżektorach jest wyraźnie możliwe, zwłaszcza jeśli proponowana koncepcja ERS zostanie ulepszona poprzez zintegrowanie najnowocześniejszych wymienników ciepła w celu wykorzystania ciepła odpadowego, co pozwoli zmniejszyć różnice temperatur i straty egzergii w pętli generatora, jednocześnie zwiększając ogólny współczynnik COP systemu.

Jeśli chodzi o część pracy doktorskiej poświęconą wynikom i dyskusji, można stwierdzić, że doktorant przeprowadził szereg eksperymentów i analiz numerycznych w celu opracowania nowego podejścia, które dokładnie ocenia wydajność R290 VGE, biorąc pod uwagę dynamiczny charakter rzeczywistego ciepła odpadowego i charakterystykę temperatury otoczenia w różnych strefach klimatycznych, a także zastosowanie alternatywnych naturalnych czynników chłodniczych – co prowadzi do maksymalizacji potencjału ERS opartego na VGE i większego zainteresowania ze strony przemysłu. Określony cel został osiągnięty, chociaż wyniki wykazały, że zakres działania R290 VGE ROM zdefiniowany w niniejszej pracy doktorskiej może być stosowany jedynie w przypadku czynników chłodniczych o bardzo podobnych właściwościach, dlatego też zakres działania ULF-VGE ROM wymaga rozszerzenia o znacznie szerszy zakres stosunków ciśnień wynikający z geometrii eżektora niż przedstawiony w niniejszej pracy doktorskiej. Z drugiej strony może to być dobry powód do kontynuowania badań w tym kierunku.

Ogólnie rzecz biorąc, część niniejszej pracy doktorskiej poświęcona wynikom i dyskusji jest bardzo dobrze napisana i zawiera wysokiej jakości ilustracyjne wykresy i tabele. Ponadto wszystkie wyniki zostały zinterpretowane w sposób ostrożny i uzasadniony.

3. Wartość merytoryczna rozprawy

Temat poruszony w niniejszej pracy doktorskiej ma wymiar międzynarodowy i stanowi okazję zarówno dla sektora akademickiego, jak i prywatnego do wyróżnienia się pod względem rozwoju technologicznego. Głównym celem jest wsparcie naukowego zrozumienia energooszczędnych, napędzanych termicznie systemów chłodniczych opartych na eżektorach, aby zaspokoić rosnące globalne zapotrzebowanie. Systemy te stanowią szczególnie obiecujące rozwiązanie w zakresie odzyskiwania ciepła odpadowego, pomagają w walce ze zmianami klimatycznymi, chronią środowisko, a przede wszystkim sprawiają, że systemy przemysłowe są bardziej zrównoważone. Jednym z głównych celów było przedstawienie narzędzi niezbędnych do rozwoju technologii eżektorowej i jej skalowania z małych do średnich zastosowań przemysłowych. Osiągnięcie tego celu doprowadzi również do nowych inwestycji w technologię chłodniczą poprzez wykorzystanie niskotemperaturowego ciepła odpadowego jako źródła napędowego, które umożliwia zastąpienie lub uzupełnienie napędzanych elektrycznie cykli sprężania pary przez cykle napędzane termicznie. Takie podejście zmniejsza zużycie energii pierwotnej i wycieki czynnika chłodniczego, które są problemami pogłębiającymi zmiany klimatyczne. Ciepło odpadowe jest zazwyczaj określane jako produkt uboczny procesów przemysłowych i często jest odprowadzane do środowiska bez wykorzystania, mimo że zawiera cenną energię cieplną.

Dlatego też przyjazne dla klimatu rozwiązania chłodnicze wykorzystujące ciepło odpadowe są niezwykle ważne z punktu widzenia warunków ekonomicznych i technicznych i budzą szczególne zainteresowanie sektora biznesowego i akademickiego. W wyniku badań opracowano, przetestowano i zamodelowano niewielką instalację ERS wyposażoną w VGE oparty na igle. System ten był napędzany ciepłem odpadowym o bardzo niskiej temperaturze i działał przy użyciu naturalnego czynnika chłodniczego R290. Nowością tego podejścia było dostosowywanie w czasie rzeczywistym współczynników powierzchni dysz napędowych poprzez przemieszczanie iglicy regulacyjnej. Pozwoliło to na utrzymanie niemal optymalnych współczynników efektywności, zwiększając w ten sposób zakres parametrów roboczych układu. Regulacja ta stanowiła podstawowy mechanizm modulacji wydajności eżektora w czasie rzeczywistym, wykazując jego przydatność w dynamicznych systemach energetycznych, takich jak odzyskiwanie ciepła odpadowego lub cykle chłodnicze o zmiennym obciążeniu.

W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono kampanię eksperymentalną, która koncentrowała się na ocenie sterowalnego eżektora R290 opartego na igle regulacyjnej, opracowaniu modeli ROM opartych na CFD w celu umożliwienia dokładnej symulacji dynamicznej, ocenie wydajności ERS w różnych warunkach otoczenia i temperaturach ciepła odpadowego oraz na analizie potencjalnego zastosowania modelu ROM R290 VGE z wykorzystaniem alternatywnych naturalnych czynników chłodniczych i ich mieszanek.

Przedstawione tutaj podejście naukowe jest rzeczywiście imponujące pod względem analizy modeli rzędu zredukowanego (ROM) opartych na wynikach CFD dla eżektorów o zmiennej geometrii (VGE) zasilanych czynnikiem R290, opracowanych z wykorzystaniem techniki POD-RBF. Obejmowało ono podejście umożliwiające szybkie i dokładne odtworzenie zachowania eżektora. Opracowano uogólniony model ROM ULF-VGE, wykorzystujący jako dane wejściowe stosunki ciśnień i temperaturę na wlocie, w celu uzyskania charakterystyki VGE wyrażonej jako współczynnik efektywności. Dzięki połączeniu tego uogólnionego modelu z matematyczną dyszą można go zastosować do alternatywnych czynników chłodniczych o podobnych właściwościach termodynamicznych, co potencjalnie rozszerza modelowanie R290 VGE na inne badania z wykorzystaniem płynów podobnych do R290, bez konieczności przebudowywania geometrii.

Ogólnie rzecz biorąc, doktorant docenił wartość współpracy z naukowcami z obu uniwersytetów. W wyniku tej współpracy możliwe było wyprodukowanie, przetestowanie i modelowanie sterowanego eżektora igłowego, który mógł dostosowywać się do zmiennych temperatur otoczenia i warunków obciążenia opisanych w niniejszej rozprawie. Analiza numeryczna małoskalowego systemu chłodzenia naturalnego opartego na eżektorze w scenariuszu zmian klimatycznych jest aktualnym tematem badawczym. Zastosowanie zaawansowanego modelowania CFD do scharakteryzowania zachowania eżektora w różnych warunkach pracy oraz wykorzystanie odpowiednich modeli o zmniejszonym rzędzie, które można zintegrować z dynamicznymi symulacjami na poziomie systemu, znacznie zwiększa wartość niniejszej pracy doktorskiej, rozszerzając jej zakres o opracowanie systemu sterowania VGE. Ma to zdecydowaną wartość inżynierską i stanowi postęp w danej dziedzinie.

4. Uwagi ogólne i szczegółowe

Po przeczytaniu niniejszej pracy doktorskiej mam kilka pytań i uwag, na które chciałbym uzyskać odpowiedź od kandydata do stopnia doktora:

1. Układ pracy oraz jej podział na rozdziały i podrozdziały wydają się być prawidłowe. Niemniej jednak proporcje poszczególnych części nie zostały zachowane, w szczególności w przypadku rozdziału Wprowadzenie (50 stron) w porównaniu z innymi rozdziałami (rozdział 2: 16 stron, rozdział 3: 29 stron, rozdział 4: 39 stron, rozdział 5: 33 strony, rozdział 6: 36 stron, rozdział 7: 17 stron i rozdział 8: 5 stron).
2. Na stronie 49 doktorant wskazał cztery cele częściowe, jednak nie sformułował własnych hipotez badawczych, których sformułowanie z pewnością miałyby wpływ na ostateczną wartość pracy naukowej przedstawionej w niniejszej rozprawie. Chciałbym poprosić doktoranta o skomentowanie tej ważnej uwagi. Jeśli istniała wstępna hipoteza, chciałbym również wiedzieć, czy doktorant był w stanie ją zweryfikować/udowodnić.
3. Moim zdaniem dyskusja na temat oryginalności niniejszej pracy doktorskiej oparta na krytyce innych najnowszych badań jest niezbędna. Proszę zatem doktoranta o wyjaśnienie tej kwestii.
4. Recenzowana rozprawa nie została przygotowana w „klasyczny sposób”, co oznacza, że nie ma „klasycznej” struktury pracy doktorskiej, która obejmowałaby wstęp, przegląd literatury, metodologię, część eksperymentalną oraz wyniki i dyskusję. Przyznaję, że w niektórych miejscach trudno było śledzić kolejne kroki doktoranta, ponieważ nie było rozdziału poświęconego metodologii. Z tego powodu chciałbym poprosić kandydata o przedstawienie schematu metodologii pracy doktorskiej.
5. Wydaje się, że we wstępie brakuje ogólnego schematu, który mógłby służyć jako przykład integracji R290 VGE opartego na igle w przemysłowym systemie chłodniczym, np. w branży detalicznej sprzedaży żywności lub innym sektorze, w którym na miejscu dostępne jest niskotemperaturowe ciepło odpadowe. Podkreśliłoby to potencjalną przydatność analizowanego rozwiązania. Dlatego chciałbym, aby doktorant dołączył taki schemat.
6. W rozdziale 3 doktorant stwierdził, że wartości bezwzględne masowego natężenia przepływu dyszy ssącej uzyskane podczas kampanii eksperymentalnej były znacznie niższe niż wartości przewidywane w symulacjach CFD przedstawionych przez grupę Besagniego i że prawdopodobnie kilka czynników przyczyniło się do tej rozbieżności. Jednym z nich, jak stwierdził doktorant, było ciśnienie dyszy napędowej w układzie eksperymentalnym, które było znacznie niższe niż ciśnienie zastosowane w analizie numerycznej, do której się odwołało, co miało bezpośredni

wpływ na potencjał porywania. Stwierdzenie to pojawia się wielokrotnie w rozprawie doktorskiej. Nie ma jednak żadnych informacji dotyczących wspomnianych wartości przewidzianych w symulacji CFD. Chciałbym poprosić doktoranta o przedstawienie informacji na temat tych rozbieżności.

7. W oparciu o doświadczenia zdobyte podczas korzystania z prototypu VGE opartego na igle regulacyjnej, chciałbym poprosić doktoranta o wyjaśnienie, w jaki sposób należałoby zmodyfikować konstrukcję VGE, aby spełniała ona cele rozwiązania zbliżonego do rynkowego, po zapewnieniu najbardziej wydajnej pracy eżektora. Jaki jest koszt inwestycyjny w produkcję eżektora na małą skalę (takiego jak ten badany w niniejszej pracy doktorskiej) i jaki byłby jego przewidywany okres zwrotu, w przypadku zastosowania w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych? Po drugie, biorąc pod uwagę główne kierunki rozwoju opisane w rozdziale 8 – w szczególności te związane z możliwymi ulepszeniami wynikającymi z połączenia modułów wieloeżektorowych opartych na FGE z VGE, co byłoby korzystne dla zakładów przemysłowych o wyraźnej dynamice termicznej, gdzie połączenie dwóch typów eżektorów mogłoby zapewnić stabilną wydajność chłodniczą niezależną od zmiennego źródła ciepła – proszę doktoranta o podanie przykładu projektu takiej architektury równoległego systemu multi-eżektora, a także potencjalnych korzyści energetycznych wynikających z jego zastosowania. Jaki byłby czas obliczeniowy w oprogramowaniu Dymola dla tego rodzaju systemu hybrydowego w ciągu jednego roku eksploatacji? Biorąc pod uwagę również kompromisy między bezpieczeństwem a wydajnością ostatecznie wybranego R1270, chciałbym zapytać doktoranta o przybliżone wymagania dotyczące ładunku czynnika chłodniczego i ograniczenia dla tego rodzaju zastosowań na skalę przemysłową.
8. Chciałbym, aby doktorant przypisał odpowiednią lokalizację pomiarową do każdego czujnika różnicy ciśnień, ponieważ nie jest to jasne z opisu (począwszy od strony 60) ani z informacji zebranych w tabeli 3.1, gdzie na stanowisku badawczym podano opis przyrządu pomiarowego, ani gdzie użyto niezdefiniowanych skrótów DP1-DP6 dla czujników różnicy ciśnień.
9. Na stronie 71 rysunek 3.6 można przedstawić za pomocą podwójnej siatki 2x2. Dodałbym więcej znaczników na osi Y, aby zbliżyć skalę osi Y do uzyskanych wyników. Ponadto chciałbym poprosić doktoranta o wyjaśnienie, dlaczego przedziały słupków błędów zaznaczone dla każdego przedstawionego punktu pomiarowego są różne. Jak na przykład należy interpretować ostatni punkt pomiarowy SP4 (rys. 3.6 c) w porównaniu z poprzednim?
10. Na stronie 81 doktorant stwierdził, że proponowane podejścia ROM oparte na danych z symulacji CFD, uzyskanych przy użyciu zaawansowanego i wszechstronnego modelu równowagi jednorodnej, mogą być wdrożone w dowolnym systemie wyposażonym w eżektor gazowy. W związku z tym chciałbym poprosić doktoranta o wskazanie, jakie dane będą niezbędne do zastosowania tego podejścia w innym systemie opartym na eżektorze?
11. W wielu przypadkach doktorant odnosił się do „rozwiązania zrównoważonego”, wskazując, że R290 VGE jest obiecującym rozwiązaniem dla zrównoważonych systemów chłodniczych, ale nie wyjaśnił jego definicji. Dlatego byłbym wdzięczny, gdyby doktorant wyjaśnił, co jego zdaniem oznaczałoby to w przypadku systemu chłodniczego opartego na eżektorze?
12. Czy w istniejącej literaturze międzynarodowej istnieją stanowiska naukowe, które pokrywają się z zakresem poznawczym, metodologicznym i badawczym pracy doktorskiej?
13. Na stronie 101, podpunkt 4.2.3. doktorant wskazał, że do kalibracji modelu przeprowadzonej w celu określenia wymaganej rozdzielczości mapy punktów CFD dla określonych zakresów roboczych w każdym porcie eżektora wybrano SP3, ponieważ był to pośredni reprezentant średniej pracy eżektora. Czy podjęto próbę analizy SP2 i/lub SP4 wraz z SP3?
14. W rozdziale 4 doktorant stwierdził, że oba modele ROM zostały opracowane przy użyciu techniki POD w połączeniu z interpolacją RBF w oparciu o dane wygenerowane wyłącznie przez model CFD. Powodem niewykorzystania danych eksperymentalnych jako zestawu danych wejściowych do opracowania modeli ROM były ograniczenia związane z dostępnym układem eksperymentalnym, którego zakres działania nie mieścił się w pożądanym zakresie warunków pracy dla analiz dynamicznych zastosowania R290 VGE w ERS (głównym systemie dla rozważanego zastosowania ROM). Chciałbym poprosić doktoranta o wskazanie, w jaki sposób zaplanowałby tę część swojej pracy doktorskiej w hipotetycznym przypadku, gdyby jakość danych eksperymentalnych była wystarczająca.
15. Proszę podać listę publikacji związanych z tematami przedstawionymi w pracy doktorskiej i wskazać wkład doktoranta w każdy z celów pracy, biorąc pod uwagę istniejącą literaturę wszystkich trzech promotorów.
16. Oprócz powyższych kwestii stwierdzono pewne problemy redakcyjne, takie jak:
 - Przydatna byłaby lista rysunków i lista tabel.
 - Strona 41, rys. 1.6. – brakuje tytułu osi x. Dodałbym „odległość wzdłuż osi”.
 - Strona 62, rys. 3.2. – Proszę o lepszą jakość zdjęć stanowiska badawczego użytego w testach R290 VGE, zwłaszcza powiększonego zdjęcia testowanego eżektora i zdjęcia ilustrującego montaż termopary.
 - Na stronie 69 doktorant zaczął przedstawiać wyniki oceny krzywych wydajności eżektora, analizując zależność między współczynnikiem eżekcji a wzrostem ciśnienia wylotowego. Zostało to wykonane dla wybranych pozycji iglicy, chociaż wybrano tylko cztery reprezentatywne pozycje iglicy, a mianowicie SPO, SP2, SP4 i SP7. Brakuje wyjaśnienia dotyczącego powodu wyboru tych pozycji iglicy regulacyjnej, o czym wspomniano dopiero na stronie 89.

- Strona 50 – w opisie rozdziału 7 brakuje części.
- Rys. 4.11, 4.12, 4.13 można przedstawić za pomocą podwójnej siatki 2x2.
- Na stronie 143 brakuje wyjaśnienia, dlaczego wybrano konkretne średnice gardzieli SP1-SP3 dla symulacji eżektora w przypadków Gliwic i Mediolanu, a także dlaczego wybrano średnice SP5-SP7 w przypadku Trondheim.
- Strona 153, rys. 5.8. – w przypadku Mediolanu nie było SP0.

5. Wnioski końcowe

Podsumowując recenzję, chciałbym podkreślić, że pomimo pewnych niedociągnięć wartość merytoryczna rozprawy jest wysoka. Cele wyznaczone na początku zostały w dużej mierze osiągnięte, co pozwala mi jednoznacznie stwierdzić, że spełnia ona wymagania dla tego typu rozpraw. Kandydat do stopnia doktora udowodnił, że jest doświadczonym specjalistą w dziedzinie napędzanych ciepłem ERS wyposażonych w eżektor o zmiennej geometrii, że jest w stanie przeprowadzić prawidłowo zaprojektowane badania z wykorzystaniem różnych technik eksperymentalnych i obliczeniowych oraz że potrafi umiejętnie interpretować uzyskane wyniki i podchodzić do nich krytycznie.

Autor wykazał się dogłębnym zrozumieniem tematyki obejmującej układy ERS wyposażone w VGE z osiowo umieszczoną iglicą, napędzane odpadowym ciepłem o bardzo niskiej temperaturze i działające z wykorzystaniem naturalnego czynnika chłodniczego R290. Ponadto wykazał się biegłością w zakresie optymalizacji działania, maksymalizując wydajność układu w zmiennych warunkach pracy. Kandydat do stopnia doktora zaprezentował również umiejętność przeprowadzania analiz obliczeniowych, wykazując się dużą biegłością w posługiwaniu się narzędziami matematycznymi. Autor rozwiązał aktualny problem naukowy, a rozprawa doktorska wnosi znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej obejmującej inżynierię środowiska, górnictwo i energetykę. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej mają wysoką wartość i mogą mieć praktyczne znaczenie w zakresie projektowania nowego podejścia obliczeniowego dla R290 i innych naturalnych czynników chłodniczych (oraz ich mieszanek) stosowanych w ERS wyposażonych w VGE, co prowadzi do lepszej analizy wydajności. Moim zdaniem rozprawa została przygotowana na bardzo wysokim poziomie. Jest napisana poprawnym językiem naukowym, a przejrzysta grafika sprawia, że jest przyjazna dla użytkownika. Pod względem merytorycznym praca ta jest przykładem ambitnie zaplanowanego zadania badawczego i jego skutecznej realizacji. Z naukowego punktu widzenia oceniam tę pracę bardzo pozytywnie. O jej jakości świadczy również fakt, że część wyników została już opublikowana w formie oryginalnej publikacji. Chociaż w rozprawie doktorskiej nie ma informacji dotyczących dorobku publikacyjnego doktoranta, warto zauważyć, że zgodnie z informacjami platformy ORCID kandydat jest współautorem różnych publikacji naukowych z listy JCR, które zostały opublikowane podczas jego edukacji w Szkole Doktorskiej Politechniki Śląskiej i Politecnica di Milano.

Podsumowując, mogę zatem stwierdzić, że recenzowana praca doktorska mgr inż. Rafała Fingasa pt. „*COMPREHENSIVE SYSTEM AND NUMERICAL ANALYSIS OF A SMALL-SCALE EJECTOR-BASED NATURAL REFRIGERATION SYSTEM*” spełnia wszystkie wymogi ustawowe (w odniesieniu do ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. ustawy o szkolnictwie wyższym i nauce; tekst jednolity: Dziennik Ustaw z 2024 r., poz. 1571, z późn. zm.) oraz zwyczajowe wymagania dotyczące rozpraw doktorskich.

W związku z powyższym zwracam się do Rady Naukowej Wydziału Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej z wnioskiem o dopuszczenie pana Rafała Fingasa do kolejnych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

[podpis nieczytelny]
Sabina Rosiek-Pawłowska

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi oryginałem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 18 marca 2026 r. Repertorium nr 076/2026.