

FORMULARZ OCENY PRACY [DOKTORSKIEJ]

Imię i nazwisko doktoranta: Rafał Fingas

Tytuł pracy:

**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”]**

Recenzent pracy:

Imię i nazwisko: Claudia Naldi

Afiliacja: Wydział Inżynierii Przemysłowej,

Alma Mater Studiorum – Uniwersytet Boloński

Adres e-mail: claudia.naldi2@unibo.it

Podpis [podpis nieczytelny]

Data 30/01/2026

Ogólne uwagi (proszę napisać krótką opinię na temat pracy dyplomowej. Proszę uzasadnić ogólną ocenę podaną poniżej).

Praca bada wydajność systemu chłodniczego z eżektorem o zmiennej geometrii (VGE) wykorzystującego propan jako naturalny czynnik chłodniczy.

Praca jest dobrze napisana i ma przejrzystą strukturę, cele są jasno określone na początku dokumentu i przywołane na początku każdej sekcji, metody są odpowiednio opisane, a wnioski poparte uzyskanymi wynikami. Analiza badanego systemu jest kompleksowa, obejmując zarówno podstawowe zagadnienia fizyki przepływu, jak i rzeczywiste działanie systemu, w tym symulacje CFD, modelowanie numeryczne i testy eksperymentalne.

W szczególności przeprowadzono szczegółowe symulacje CFD eżektora VGE w celu zbadania wewnętrznej struktury przepływu w eżektorze pod kątem rozkładu ciśnienia, zachowania dławienia i zjawisk mieszania. Ta dogłębna analiza nie ma charakteru czysto opisowego: wyniki są wykorzystywane do tworzenia map wydajności, które są następnie wykorzystywane do opracowania dwóch różnych modeli o zmniejszonym rzędzie (ROM), mających na celu symulację wydajności całego systemu chłodniczego w dynamicznych warunkach brzegowych, co skutkuje powstaniem narzędzia istotnego z punktu widzenia inżynierii.

Zdolność systemu do dostosowania się do zmiennych temperatur otoczenia i warunków obciążenia jest badana dość wyczerpująco, z uwzględnieniem zarówno trzech różnych stref klimatycznych, jak i trzech różnych rzeczywistych profili ciepła odpadowego w przemyśle, podkreślając warunki, w których proponowany system przewyższa tradycyjne eżektory o stałej geometrii, a także wskazując możliwości poprawy. Ponadto wykazano możliwość rozszerzenia jednego z opracowanych modeli ROM na systemy chłodnicze VGE z różnymi naturalnymi czynnikami chłodniczymi i mieszkankami oraz przeprowadzono analizę porównawczą wydajności systemu w zależności od zastosowanego czynnika chłodniczego.

Niestety, warunki brzegowe narzucone przez obiekt eksperymentalny uniemożliwiły skuteczne wykorzystanie wyników eksperymentów do późniejszej analizy numerycznej, ale przedstawione badanie wykazuje solidną znajomość zarówno technik pomiarowych, jak i analizy niepewności.

Podsumowując, praca stanowi cenny wkład w zrozumienie zachowania systemu chłodniczego z eżektorem o zmiennej geometrii w dynamicznie zmiennych warunkach oraz w dalsze promowanie jego zastosowania w rzeczywistych aplikacjach.

W ostatniej części niniejszego dokumentu przedstawiono kilka próśb o wyjaśnienia i sugestii dotyczących ulepszeń.

Ogólna ocena. Proszę zaproponować możliwy wynik oceny spośród następujących opcji:

☐ Praca doktorska nie jest gotowa do obrony. Konieczne są poważne poprawki: proszę je wymienić i wyjaśnić w formie ostatniej strony.

☒ Doktorat może zostać przyznany. ☒ Sugerowane drobne poprawki: proszę je wymienić i wyjaśnić na ostatniej stronie;

☐ Doktoratowi można przyznać *cum laude* (10% najlepszych)

[koniec strony 2 z 5]

Tabela oceny 1 z 2 (proszę zaznaczyć odpowiednie pole: 4 – doskonała, 3 – bardzo dobra, 2 – dobra, 1 – dostateczna, 0 – słaba, N/A, nie dotyczy). Proszę dodać krótki komentarz, jeśli ocena jest dostateczna lub słaba.

Rzetelność naukowa i znaczenie	Doskonała = 4	B. dobra = 3	Dobra = 2	Dostateczna = 1	Słaba = 0	Nie dotyczy	Uwagi
Szerokie znaczenie/zainteresowanie tematem badań		✓					
Dobrze określone i poparte naukowo cele	✓						
Adekwatność podejścia metodologicznego	✓						
Jakość stanowiska eksperymentalnego			✓				
Nowatorskość podejścia		✓					
Wkład w rozwój wiedzy w danej dziedzinie	✓						
Jakość wyników		✓					
Zainteresowanie zastosowaniami	✓						
Dyskusja i wnioski trafne i właściwie uzasadnione		✓					

[koniec strony 3 z 5]

Tabela oceny 1 z 2 (proszę zaznaczyć odpowiednie pole: 4 – doskonała, 3 – bardzo dobra, 2 – dobra, 1 – dostateczna, 0 – słaba, N/A, nie dotyczy). Proszę dodać krótki komentarz, jeśli ocena jest dostateczna lub słaba.

Praca doktorska jako dokument	Doskonała = 4	B. dobra = 3	Dobra = 2	Dostateczna = 1	Słaba = 0	Nie dotyczy	Uwagi
Jakość streszczenia (czy jest wyczerpujące?)		✓					
Organizacja dokumentu. Odpowiednia równowaga między poszczególnymi częściami pracy	✓						
Adekwatność bibliografii	✓						
Przejrzystość		✓					
Skuteczność komunikacji	✓						
Odpowiednio uzasadniona dyskusja i wnioski		✓					

[koniec strony 4 z 5]

W przypadku gdy poprawki są wymagane (poważne) lub po prostu sugerowane (drobne), proszę je wymienić i wyjaśnić poniżej.

Poniżej przedstawiono kilka sugestii dotyczących drobnych poprawek.

Sekcja 1.7 mogłaby nosić tytuł „Treść”, ponieważ opisuje treść każdego rozdziału.

Sekcja 2.1: Brakuje uzasadnienia wyboru geometrii VGE. Kandydat powinien omówić, dlaczego wybrano takie konkretne długości i kąty, zaczerpnięte z poprzednich prac. Proszę również skupić się na powodach wyboru krótkiego odcinka o stałej powierzchni i obecności kolejnego odcinka o stałej powierzchni 11 mm.

Sekcja 2.2: Można by wyjaśnić, dlaczego 7 mm jest ostatnią pozycją iglicy, w której eżektor może wciągnąć strumień wtórny. Proszę sprawdzić równanie 2.1: AR jest zdefiniowane jako stosunek efektywnej powierzchni gardzieli do stałej powierzchni wylotu dyszy, ale wzrasta, gdy efektywna powierzchnia maleje.

Sekcja 3: Procedury i wyniki kampanii eksperymentalnej są szczegółowo opisane, ale tytuł pracy odnosi się wyłącznie do analizy numerycznej, prawdopodobnie dlatego, że wyniki eksperymentów nie zostały wykorzystane jako dane wejściowe do stworzenia ROM. Czy planowane są przyszłe testy eksperymentalne w warunkach podobnych do tych z analizy numerycznej? Sprężarka służy do wytwarzania gazu pod wysokim ciśnieniem, który jest kierowany do wlotu dyszy eżektora, ale nie została uwzględniona na schemacie instalacji badawczej przedstawionym na rysunku 3.1: proszę wyjaśnić rozmieszczenie poszczególnych elementów instalacji. Analizowane pozycje iglicy mieszczą się w zakresie od SP0 do SP7, co daje łącznie 8 konfiguracji. Jednak na rysunku 3.5 widocznych jest 9 znaczników, a SP7 (gdzie nie zaobserwowano mierzalnego przepływu ssania) jest wymienione jako 8 mm: proszę o wyjaśnienie. Od SP0 do SP4 eżektor działa w trybie pojedynczego dławienia: jaki to ma wpływ na wydajność urządzenia?

Sekcja 4: Zakresy warunków brzegowych dla symulacji numerycznych podano w tabeli 4.1, ale proszę również zdefiniować kroki wybrane dla każdego parametru, które pozwoliły na uzyskanie 275 968 przypadków. Analiza niezależności wyników od siatki obliczeniowej powinna zostać pogłębiona; zastosowano dwa cykle zagęszczania siatki, ale w jaki sposób wykazano, że osiągnięto zbieżność siatki? Czy model CFD został zweryfikowany w odniesieniu do wyników literaturowych dla podobnych eżektorów VGE? Czas obliczeń dla symulacji CFD (30-45 minut) powinien być uzupełniony o charakterystykę techniczną używanego komputera. W sekcji 4.1.4 wybrano cztery reprezentatywne pozycje iglicy; zachowanie SP7 znacznie różni się od zachowania SP0-4: jaka jest graniczna wartość SP, przy której następuje odwrócenie przepływu i nieprawidłowe działanie eżektora? Na rysunku 4.7 błąd względny osiąga -50%, ale w tekście podano -100%. W sekcji 4.6 [mowa o] trzech wariantach ROM, podczas gdy powinny być dwa.

Sekcja 5: Proszę wyjaśnić parametry płynu pomocniczego (Therminol 59) w generatorze: w sekcji 5.1 na stronie 127 drugi płyn w modelu lutowanego płytowego wymiennika ciepła jest traktowany jako ciecz nieściśliwa, ale na początku sekcji 5.1 źródło ciepła odpadowego ma poziom przegrzania i stałą temperaturę 90 °C, podczas gdy później stała temperatura źródła ciepła odpadowego wynosi 95 °C. Na stronie 123 i na rysunku 5.1 różnica temperatur między wlotem a wylotem pętli pomocniczej wynosi 4 K, natomiast na stronie 132 regulator utrzymuje stałą różnicę temperatur między wlotem a wylotem generatora wynoszącą 15 K. Czy w skraplaczu i parowniku miedź została wybrana jako materiał również na żebra? W wybranym typowym dniu, Trondheim ma najniższą maksymalną temperaturę otoczenia, więc wydajność parownika jest wyższa niż w pozostałych dwóch miastach (rysunek 5.7 w porównaniu z 5.5-5.6), ale czy budynek w Trondheim nie wymaga niższej wydajności chłodniczej niż budynki w Mediolanie i Gliwicach? Ograniczyłoby to wykorzystanie wyższego potencjału parownika VGE w Trondheim, co ostatecznie doprowadziłoby do uzyskania wartości COP niższych niż te podane w tabeli 5.7 w rzeczywistych zastosowaniach. Czy można oszacować spadek COP w przypadku wyboru miasta o wyższych temperaturach latem, powyżej 30 °C? Rysunek 5.8: czy jest

dotatkowy słupek (Mediolan, SP0), którego nie ma w tekście? W 5.4-Wnioski, w Trondheim VGE dostosowuje się do bardziej korzystnej geometrii podczas szczytów w południe (od SP7 do SP6), ale na rysunku 5.7 COP spada w takiej sytuacji.

Sekcja 6: Obserwuje się odwrotną zależność między współczynnikiem COP a temperaturą otoczenia, podczas gdy spadek temperatury źródła powoduje niewielki spadek współczynnika COP: czy możemy stwierdzić, że między dwiema zmiennymi niezależnymi, wahania temperatury otoczenia mają ogólnie silniejszy wpływ na wartość współczynnika COP układu VGE niż wahania temperatury źródła ciepła odpadowego? Przy omawianiu wyników, pomocne w zrozumieniu uwag byłoby przedstawienie również temperatury źródła (ciepła odpadowego) na wykresach z rysunków 6.4-6.21.

Sekcja 7: Jakie było kryterium wyboru reprezentatywnego punktu pracy użytego do sprawdzenia zgodności innych czynników chłodniczych z limitami ULF-VGE ROM? W drugim wierszu po równaniu 7.6 może brakować odniesienia. Dlaczego na rysunku 7.4 niebieskie wskaźniki (SP0) często znajdują się powyżej czerwonych (SP1)? Na końcu strony 210 mieszanka 40% R290/55% R1270/5% R600a, osiągająca średni współczynnik COP wynoszący 0,47, nie wydaje się działać lepiej, jak deklarowano, niż czysty R290 (COP = 0,49).

Czy w przyszłych pracach rozwojowych system VGE zostanie przetestowany w rzeczywistym zastosowaniu? Czy można oszacować oszczędności energetyczne i ekonomiczne badanego systemu w porównaniu z tradycyjnymi agregatami chłodniczymi z kompresją pary?

[koniec strony 5 z 5]

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 4 marca 2026 r. Repertorium nr 077/2026.