



Dr. hab. inż. Kamil Śmierciew, prof. uczelni  
Katedra Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok, PL  
tel.. 571 443 096  
500 477 704  
e-mail: k.smierciew@pb.edu.pl

Białystok, 20.09.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Mgr inż. Sindu Daniarta**  
***Analysis of the low-boiling working fluid expansion processes in the volumetric expander operating in the ORC system***

Recenzja została przygotowana w związku z powołaniem przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, uchwałą nr 1023/44/RDN08/2021-2024, mojej osoby do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora mgr inż. Sindu Daniarta. Promotorami rozprawy są prof. dr hab. inż. Piotr Kolasiński z Politechniki Wrocławskiej oraz prof. Attila R. Imre, PhD, DSc z Budapest University of Technology and Economics na Węgrzech. Praca została przygotowana i złożona w dyscyplinie: **inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce), recenzent ocenia, czy rozprawa doktorska **wykazuje ogólną teoretyczną wiedzę kandydata na stopień doktora**, wskazuje na **umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej** oraz czy **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**. Recenzja została przygotowana w celu oceny tych trzech kryteriów.

**Krótkie streszczenie rozprawy**

Rozprawa została napisana w języku angielskim i liczy łącznie 143 strony. Składa się z następujących części: **nienumerowanych** (na początku) – streszczeń (w języku angielskim, polskim i węgierskim), deklaracji autora, podziękowań, spisu treści, listy rysunków, listy tabel, nomenklatury; oraz na końcu pracy: bibliografii, listy publikacji autora związanych z tą rozprawą i Załącznika A, **numerowanych**: Wprowadzenie (rozdział 1), Analiza procesu rozprężania płynu roboczego o niskiej temperaturze wrzenia wpływająca na efektywność wybranych systemów ORC pracujących w warunkach podkrytycznych (rozdział 2), Analiza procesu rozprężania płynu roboczego o niskiej temperaturze wrzenia w różnych systemach ORC, od warunków podkrytycznych do nadkrytycznych (rozdział 3), Badania eksperymentalne i analiza oparta na sztucznej inteligencji dwufazowego ekspandera pracującego w systemie ORC (rozdział 4), Analiza adaptacyjności ekspanderów objętościowych w wybranych systemach ORC wykorzystujących źródła ciepła o niskiej i średniej temperaturze (rozdział 5), Podsumowanie (rozdział 6).

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wpłynęło dnia 25.09.2024 r.

1 z 6

Szczegółowa zawartość rozdziałów:

**Wprowadzenie.** Ta część przedstawia tło i motywację do badań oraz opisuje obecny stan wiedzy. Przedstawiono prosty obieg ORC i jego warianty w odniesieniu do temperatury źródła ciepła, w tym Trilateral Flash Cycle (TFC) lub Trilateral ORC, Obieg z częściowym odparowaniem ORC (PE-ORC), przegrzany obieg ORC(sup-ORC) oraz obieg nadkrytyczny (TPC) lub nadkrytyczny ORC. Szczególną uwagę poświęcono procesowi rozprężania, w tym klasyfikacji maszyn rozprężnych, ze szczególnym uwzględnieniem ekspanderów objętościowych. Rozdział kończy się przedstawieniem celów badawczych.

**Rozdział 2.** przedstawia krótką historię i klasyfikację niskowrzących płynów roboczych z podziałem na trzy typy: mokre, suche i izentropowe. Opisano nową metodę klasyfikacji, zaczerpniętą z literatury, która opiera się na charakterystykach entropii w pięciu punktach. Znacznik „A” to punkt potrójny na przecięciu fazy ciekłej i stałej, znacznik „Z” to punkt potrójny na przecięciu fazy stałej i parowej, „C” oznacza punkt krytyczny, a markery „M” i „N” wskazują maksima i minima lokalne entropii właściwej na krzywej nasycenia pary. Rozdział przedstawia metodykę symulacji modelowania termodynamicznego i koncentruje się na teoretycznej analizie procesu rozprężania niskowrzących płynów oraz jego wpływu na efektywność obiegu w różnych systemach ORC w warunkach podkrytycznych. Przedstawiono także porównanie efektywności obiegu w różnych systemach ORC, zależne od rodzaju płynu roboczego.

Kontynuując teoretyczną analizę, **rozdział 3.** zawiera wyniki analiz jak proces rozprężania wpływa na efektywność różnych konfiguracji ORC, w tym obiegu z przegrzewaczem. Porównuje systemy ORC działające w warunkach podkrytycznych i nadkrytycznych, z naciskiem na rolę różnych płynów roboczych wpływających na efektywność cyklu.

**Rozdział 4.** Celem tego rozdziału jest wykazanie możliwości użycia ekspandera wielołopatkowego w systemach ORC działających w warunkach dwufazowych oraz ocena jego wydajności. Wstępne wyniki wskazują, że ekspander wielołopatkowy jest w stanie działać w warunkach dwufazowych. Ponadto rozdział przedstawia innowacyjne podejście poprzez połączenie metod eksperymentalnych z technikami sztucznej inteligencji. Opisano szczegółowo stanowisko testowe oraz system pomiarowy. Głęboka sieć neuronowa (DNN) została przeszkolona w celu identyfikacji relacji między zmiennymi wejściowymi a ich wynikami, analizując dane z modelu.

**Rozdział 5.** Rozdział ten omawia różne rzeczywiste zastosowania systemów ORC z ekpanderem objętościowym, koncentrując się na wybranych zagadnieniach termodynamicznych. Opisano potencjalne zastosowanie ORC do wykorzystania okresowych i zmiennych źródeł ciepła, takich jak źródła geotermalne oraz wykorzystanie energii niskotemperaturowej. Zaproponowany został projekt systemu ORC do wykorzystania energii niskotemperaturowej w przemyśle farmaceutycznym. W różnych scenariuszach system ORC jest wykorzystywany do utylizacji ciepła odpadowego lub w systemach centralnego ogrzewania oraz technologii akumulatorów Carnota.

**Rozdział 6.** Ostatni rozdział dostarcza podsumowania badań, podkreślając kluczowe wyniki i główne wkłady pracy. Autor przedstawia wnioski, które są uzasadnione i poparte wynikami. Zaproponowano również kierunki przyszłych badań.

**Bibliografia** zawiera 143 pozycje, z czego doktorant jest współautorem jedenastu prac opublikowanych w recenzowanych czasopismach oraz ośmiu wystąpień na międzynarodowych konferencjach. Cytowane prace to książki, artykuły naukowe, referaty konferencyjne, raporty oraz regulacje prawne.

Smilew

**Załącznik** zawiera klasyfikację płynów roboczych według skrótów opublikowanych w czasopiśmie naukowych, wzory chemiczne oraz właściwości termiczne, w tym temperatury wrzenia, punktu potrójnego i krytycznego oraz ciśnienia krytycznego.

### **Cele i zakres rozprawy doktorskiej**

Zdolność do zidentyfikowania problemu naukowego i zaprezentowania innowacyjnego rozwiązania jest kluczowa w ocenie pracy doktorskiej. Kandydat definiuje główny cel rozprawy jako kompleksową analizę procesu rozprężania niskowrzących płynów roboczych i jej wpływu na efektywność różnych konfiguracji systemów ORC. Przeprowadzone analizy koncentrują się na opisie zmian efektywności w zależności od rodzaju płynu roboczego oraz warunków termodynamicznych. Innowacyjne podejście, polegające na przewidywaniu efektywności izentropowej za pomocą sztucznej inteligencji, ma na celu redefiniowanie standardów efektywności dla systemów ORC.

Autor wymienia pięć głównych celów pracy:

1. Analiza wpływu procesu rozprężania niskowrzących płynów roboczych na efektywność różnych systemów ORC w warunkach podkrytycznych dla ekspanderów objętościowych,
2. Analiza wpływu procesu rozprężania niskowrzących płynów roboczych na efektywność różnych systemów ORC w warunkach nadkrytycznych,
3. Ocena i porównanie zmian efektywności w różnych systemach ORC zależnych od rodzaju płynu roboczego w warunkach podkrytycznych i nadkrytycznych,
4. Eksperymentalna weryfikacja efektywności izentropowej procesu rozprężania niskowrzących płynów roboczych w systemie ORC z wykorzystaniem predykcji AI,
5. Analiza adaptacyjności i korzyści z wdrażania ekspanderów objętościowych w różnych systemach ORC.

Cele pracy i jej zakres zostały zdefiniowane prawidłowo i precyzyjnie.

### **Metodyka badacza i realizacja założonych celów**

Autor rozprawy zastosował właściwą i adekwatną procedurę rozwiązywania problemów badawczych. Najpierw problem został opisany i zdefiniowany na podstawie szczegółowego przeglądu literatury. Następnie przedstawiono zestaw równań umożliwiających szczegółową analizę. Zaprezentowano również i opisano schematy algorytmu obliczeniowego. Systematyczne obliczenia oraz analiza wyników pozwoliły na wyciągnięcie wniosków. W rezultacie zrealizowano cele 1-3. Tezy 1-4, zdefiniowane w rozdziałach 2 i 3, odpowiadają tym wnioskom.

Badania eksperymentalne prowadzone przez doktoranta koncentrowały się głównie na ekspanderze wielołopatkowym, wypełniając istotną lukę w badaniach nad ekspanderami dwufazowymi, jak to zostało zidentyfikowane w przeglądzie literatury. Stanowisko badawcze zostało przygotowane do testów silnika pneumatycznego wielołopatkowego, pełniącego funkcję ekspandera, o maksymalnej mocy wyjściowej około 300 W. Stanowisko było dobrze wyposażone, a wszystkie niezbędne parametry były mierzone za pomocą zaawansowanego systemu monitorującego. Głównym celem eksperymentu była analiza wydajności i warunków pracy ekspandera w warunkach dwufazowych. Wynikiem badań była izentropowa sprawność ekspandera podczas procesu rozprężania dwufazowego. Wyniki te zostały wykorzystane przez sztuczną inteligencję do przewidywania tzw. mokrej sprawności izentropowej ekspandera dwufazowego. Tym samym zrealizowano cel 4, a tezy 5 i 6 koresponduje z wynikami.



Analiza przedstawiona i omówiona w rozdziale 6 pokazuje potencjalne zastosowanie systemu dwufazowego rozprężania w poprawie efektywności systemów ORC (Organicznego Cyklu Rankina). Doktorant krótko opisuje problem i prezentuje diagramy oraz równania potrzebne do obliczeń. Wyniki jednoznacznie wskazują, że ten system może być zintegrowany ze źródłami energii geotermalnej o niskiej i średniej temperaturze, wykorzystywany do odzyskiwania energii niskotemperaturowej oraz stosowany w odzysku ciepła odpadowego. Kluczowe wnioski z tej analizy są podsumowane w Tezie 7, która nawiązuje do celu nr 5.

**Wniosek:** Procedura rozwiązywania problemów oraz metody zaproponowane i zastosowane przez doktoranta w pełni odpowiadają celom pracy. Pod tym względem plan pracy nie budzi zastrzeżeń. Wszystkie zdefiniowane cele zostały osiągnięte, co czyni rozprawę kompletną. Tym samym **recenzowana praca doktorska spełnia podstawowe kryteria, wykazując teoretyczną wiedzę doktoranta w danej dyscyplinie.**

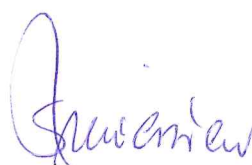
### **Oryginalność, znaczenie dla dziedziny oraz możliwe zastosowania**

Recenzowana praca doktorska porusza fundamentalne kwestie związane z efektywnością energetyczną maszyn przepływowych stosowanych zarówno w małych, jak i dużych systemach wytwarzania energii. Rozprawa bada wpływ parametrów pracy oraz rodzaju płynu roboczego na efektywność ekspandera działającego w regionie dwufazowym, stosowanego w siłowniach ORC. Systemy ORC mają potencjalne zastosowanie w wytwarzaniu energii, szczególnie w obszarach wykorzystujących niezawodne źródła ciepła o niskiej i średniej temperaturze, takie jak ciepło geotermalne, energia oceaniczna, energia słoneczna, spalanie biomasy i ciepło odpadowe, które zwykle charakteryzują się niską sprawnością. Mimo, że te źródła ciepła mogą być niestabilne i zmienne, nadal mogą być skutecznie wykorzystywane za pomocą dobrze zaprojektowanych cykli termodynamicznych. Dlatego maksymalizacja efektywności energetycznej jest kluczowym celem badawczym. Rozprawa, częściowo wypełnia lukę w tej dziedzinie i bada wpływ temperatury źródła ciepła na efektywność energetyczną cyklu ORC dla różnych płynów roboczych i konfiguracji systemu, w tym cykli podkrytycznych, nadkrytycznych i superkrytycznych.

Doktorant przeprowadził szereg badań obliczeniowych i eksperymentalnych. Kompleksowe podejście zastosowane przez doktoranta **można uznać za oryginalne**. Rozpoczynając od zidentyfikowania potrzeby przeprowadzenia badań, ukończono zadania analityczne, a następnie przeprowadzono badania eksperymentalne. Wyniki eksperymentów posłużyły jako dane wejściowe do określenia parametrów wyjściowych ekspandera, przy użyciu sztucznej inteligencji, szczególnie stopnia zawilgocenia pary, a w efekcie sprawności izentropowej. Na podstawie analizy studiów przypadku wykazano korzyści wynikające z zastosowania systemów cyklu ORC w wytwarzaniu energii.

#### Za istotne osiągnięcia doktoranta uważam:

- kompleksową analizę zależności między temperaturą źródła ciepła, rodzajem płynu roboczego a konfiguracją obiegu a jego sprawnością,
- opracowanie planu eksperymentu,
- przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych, co zaowocowało dużą liczbą punktów pomiarowych,
- analizę wyników eksperymentów, w tym zastosowanie sztucznej inteligencji do przewidywania tzw. mokrej sprawności izentropowej z zastosowaniem sztucznej inteligencji,
- przeprowadzenie kompleksowej analizy zastosowania ekspanderów objętościowych w wybranych systemach ORC na podstawie scenariuszy studiów przypadków.



Należy podkreślić, że badania przedstawione i omówione w rozprawie zostały opublikowane w uznanych czasopiśmie naukowych oraz przedstawione na międzynarodowych konferencjach. Oznacza to, że prace doktoranta cieszą się dużym zainteresowaniem. Uzyskane wyniki badań pokazują szeroki zakres możliwości zastosowania systemów ORC w różnych konfiguracjach i gałęziach przemysłu. Wyniki przedstawionych studiów przypadków pokazują, że zastosowanie systemów ORC z dwufazowym ekspanderem może korzystnie wpłynąć na rozwój niskoemisyjnej energetyki, w tym naturalnych i odpadowych źródeł energii, umożliwiając przynajmniej częściowe odciążenie środowiska od negatywnych skutków działania systemów zasilanych paliwami kopalnymi. Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia badań, w tym modelowania analitycznego, badań eksperymentalnych i wykorzystania sztucznej inteligencji. Uważam zarówno metodykę badań eksperymentalnych, jak i analizy teoretyczne za poprawne. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników jest racjonalna i wnosi wkład do stanu wiedzy.

### Strona edytorska rozprawy

Rozprawa przedstawia oryginalne i kompleksowe podejście do omawianego zagadnienia. Napisana jest starannie, przejrzysto, a wyniki są prezentowane w bardzo przystępny sposób co ułatwia ich odbiór i zrozumienie. Wnioski są rzetelne i poparte wynikami. Używana jest poprawna nomenklatura naukowa i techniczna. Bibliografia i cytaty są jasno zaznaczone w tekście. Mimo że rozprawa jest bardzo dobrze przygotowana, nie uniknięto drobnych niedociągnięć, które zazwyczaj w tego typu po prostu się zdarzają. Jednak poniższe uwagi należy traktować jako sugestie, które mogą poprawić klarowność prezentacji przyszłych badań doktoranta i nie umniejszają mojej **pozytywnej opinii** o pracy doktorskiej.

### Uwagi

1. Tabela 1.1 zawiera listę badań eksperymentalnych nad systemami ORC, jednak dyskusja prezentowanych w tabeli treści jest uboga, zwłaszcza w kontekście bardzo niskiej sprawności zgłaszanej przez badaczy.
2. W pracy pominięty został aspekt ekologiczny analizowanych czynników roboczych. W świetle obowiązującego prawa, wpływ czynników roboczych na środowisko ma kluczowy charakter i nie powinien być pominięty.
3. Na rysunku 2.7g autor wskazuje, że w niektórych przypadkach sprawność cyklu z ekspanderem zasilanym moką parą jest wyższa niż z zasilaniem parą suchą. Różnice te są jednak bardzo małe, widoczne tylko na trzecim lub czwartym miejscu po przecinku. Wyniki powinny zostać poddane krytycznej analizie, ponieważ warto zastanowić się, czy niedokładności równań stanu nie są większe niż wspomniane różnice w wynikach.
4. Praca analizuje przypadki o bardzo małym prawdopodobieństwie wystąpienia, takie jak rozprężanie dokładnie przechodzące przez punkt krytyczny. Warto byłoby uzasadnić potrzeby uwzględnienia takich przypadków w analizie.
5. W sekcji 4.1 stwierdzono, że stanowisko badawcze zostało specjalnie przygotowane. Nie wyjaśniono jednak, co to dokładnie oznacza, ani nie wspomniano o wkładzie doktoranta w przygotowanie stanowiska.
6. Niejasne jest, dlaczego do określenia mokrej sprawności izentropowej użyto sztucznej inteligencji. Wyniki użyte do przyuczenia SI są wyznaczone tylko dla jednej maszyny rozprężającej i nie wyjaśniono, jak dokładne byłyby prognozy dla innych ekspanderów. Wyjaśnienie tego pomogłoby lepiej zrozumieć zastosowaną metodykę.
7. W sekcji 4.2.1 doktorant pisze, że temperatura źródła wahała się od 350,68 K do 361,93 K. Należy zauważyć, że są to wartości bardzo precyzyjne, a podawanie zakresu temperatury z

*Opinia*

dokładnością do setnych części kelwina jest niewłaściwe, biorąc pod uwagę dokładność użytych przyrządów pomiarowych.

8. W rozdziałach 2 i 3 założono, że izentropowa sprawność ekspandera wynosi 0,80, podczas gdy eksperymenty wykazały wartości od 0,35 do 0,50. Warto byłoby omówić i skomentować tę rozbieżność.
9. W świetle wyników eksperymentalnych, wskazane byłoby przeprowadzenie obliczeń cyklu dla czynnika roboczego R123 i porównanie wyników.
10. W kilku miejscach temperatura jest opisana za pomocą terminu „około”, a jej wartość podana z precyzją do 0,01 K. Taka precyzja i termin „około” wzajemnie się wykluczają.

**Wniosek:** Wyniki przedstawione w rozprawie są oryginalne i stanowią wkład poznawczy oraz aplikacyjny w dziedzinie inżynierii środowiska – szczególnie w inżynierii środowiska, górnictwie i energetyce. Tym samym **recenzowana rozprawa doktorska wykazuje zdolność osoby ubiegającej się o stopień doktora do samodzielnego prowadzenia prac naukowych.** Ponadto przedstawione w pracy wnioski można uznać za **oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W związku z tym spełnione zostały dwa kolejne kryteria stawiane pracy doktorskiej.** Tym samym praca jest kompletna i spełnia wszystkie wymagane kryteria.

#### **Uwagi końcowe**

Praca zawiera wartościowe i oryginalne wyniki badań nad wpływem procesu rozprężania czynników roboczych o niskiej temperaturze wrzenia na sprawność różnych systemów ORC w różnych warunkach pracy dla ekspanderów objętościowych. Osiągnięcia przedstawione w rozprawie wymagają systematycznej pracy i badań. Dobrze zdefiniowane cele zostały zrealizowane w ramach spójnych badań eksperymentalnych i analitycznych. Uzyskane wyniki z pewnością uzupełnią bazę danych eksperymentalnych i mogą zostać wykorzystane przez innych badaczy i doktorantów do dalszej pracy nad urządzeniami rozprężającymi. Wyniki przedstawione w tej rozprawie przekonują mnie jako recenzenta, że mgr inż. Sindu Daniarta posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Praca spełnia wszystkie kryteria rozprawy doktorskiej. **Ogólna ocena: POZYTYWNA.** Tym samym rekomenduję ją do przyjęcia, dopuszczenia do obrony oraz przyznania stopnia doktora nauk technicznych.

#### **Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej**

Rozprawa przedstawia zaawansowaną i dobrze zorganizowaną systematykę czynników roboczych, która oprócz powszechnie stosowanej klasyfikacji na czynniki mokre, izentropowe i suche, uwzględnia także położenie punktu potrójnego, punktu krytycznego oraz maksymalne i minimalne wartości entropii właściwej dla pary suchej nasyconej w analizowanych zakresach ciśnienia.

Ponadto, rozprawa obejmuje szeroki zakres analiz teoretycznych, które dotyczą różnych konfiguracji obiegu, w tym systemów transkrytycznych. Dodatkowo, Doktorant przedstawił wyniki analiz teoretycznych obejmujących szeroki wachlarz zastosowań systemów ORC w różnych gałęziach przemysłu. Prezentowane wyniki mają charakter eksploracyjny i poszerzają możliwości praktycznej aplikacji.

Co więcej, zastosowanie sztucznej inteligencji, która może w przyszłości zostać wykorzystana do określenia izentropowej sprawności maszyn rozprężających, a tym samym do poprawy efektywności obiegu termodynamicznego, jest zarówno oryginalne, jak i praktyczne, niezależnie od ograniczeń wynikających z analizy danych pojedynczego egzemplarza.

Biorąc pod uwagę powyższe, wnioskuję o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej.

*S. Spisiewicz*