

Wrocław, 16.01.2023

Prof. dr hab. inż. Piotr Kolasiński
Katedra Termodynamiki
i Odnawialnych Źródeł Energii
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja

Rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Arkadiusza Musiała pt.: „Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych”

1. Podstawa opracowania recenzji i informacje ogólne

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina, z dnia 15.11.2022 informujące o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Arkadiusza Musiała.

Praca doktorska pt.: „Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych” wykonana została przez Pana mgr. inż. Arkadiusza Musiała pod kierunkiem promotora Pana dr. hab. inż. Jacka Kaliny i promotora pomocniczego Pana dr. inż. Łukasza Antczaka w ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki „Doktorat wdrożeniowy II edycja”.

2. Aktualność tematu rozprawy

Regulacje międzynarodowe dotyczące konieczności zwiększenia udziału energii pochodzącej ze źródeł alternatywnych w rynku i ograniczania emisji gazów cieplarnianych doprowadziły do intensyfikacji prac naukowych i wdrożeniowych, których celem jest poszukiwanie i rozwijanie innowacyjnych metod pozyskiwania i konwersji energii. Poprawa sprawności układów konwersji energii poprzez zmniejszenie ich energochłonności jest jednym z obiecujących sposobów spełnienia tych wymagań. Jedną z metod zmniejszania energochłonności jest efektywne zagospodarowanie zasobów przemysłowej energii odpadowej a w szczególności ciepła odpadowego. Możliwą do wykorzystania technologią w tym zakresie są układy ORC. W wielu jednostkach naukowych na świecie prowadzone są obecnie badania i prace rozwojowe dotyczące tych układów. Tematyka prowadzonych badań dotyczy m.in. doboru czynnika roboczego, konfiguracji układów oraz ich optymalizacji. Zagadnienia związane z optymalizacją układów ORC są obecnie jednym z wiodących kierunków badań i dotyczą najczęściej aspektów technicznych i ekonomicznych.

Biorąc pod uwagę powyższe, uważam wybór tematu pracy doktorskiej za trafny i istotny z naukowego i wdrożeniowego punktu widzenia. Jego realizacja daje Doktorantowi możliwość wykazania się umiejętnościami z zakresu analizy i optymalizacji procesów zachodzących w układach ORC, modelowania matematycznego i wdrażania wyników swoich prac w przemyśle.

3. Charakterystyka treści rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa ma głównie charakter studialno-analityczny z odniesieniem do wyników badań eksperymentalnych prowadzonych na prototypowych układach ORC będących rezultatami prac badawczo-rozwojowych realizowanych przez firmę Marani Sp. z o.o.

Treść rozprawy przedstawiono na 102 stronach z zachowaniem podziału na spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń, 11 rozdziałów oraz wykaz cytowanej literatury. W pracy zamieszczono 68 rysunków, 22 tabele, i 77 pozycji literatury.

Rozdział 1 pt.: *Wprowadzenie* (34 strony) nakreśla zarys tematyczny rozprawy. W pierwszej części rozdziału Autor wprowadza pojęcie ciepła odpadowego, wskazuje na przykłady źródeł ciepła odpadowego występującego w przemyśle, określa jego nośniki i zakres temperatury. Wskazuje też na techniki wykorzystania ciepła odpadowego za pomocą regeneratorów i rekuperatorów. Następnie omawia alternatywne dla układów ORC technologie konwersji ciepła odpadowego w energię elektryczną. W dalszej części rozdziału Autor poświęca uwagę układom ORC i przedstawia wyniki rozeznania literatury w zakresie zagadnień związanych z konfiguracją układów, ich podzespołami, stosowanymi czynnikami roboczymi i dokonuje przeglądu układów ORC przeznaczonych do odzysku ciepła odpadowego produkowanych przez różnych producentów. Następnie Autor w oparciu o dane literaturowe przeprowadza analizę dotyczącą dostępnego w Polsce potencjału przemysłowego ciepła odpadowego, które mogłoby być zagospodarowane przy wykorzystaniu układów ORC. W ostatniej części rozdziału 1 rozprawy przedstawiono cel i zakres pracy oraz tezę badawczą.

Jako główny wynik realizacji pracy doktorskiej Autor wskazuje oprogramowanie komputerowe wspomagające proces konfiguracji rozwiązania technologicznego układu ORC dla określonego źródła ciepła, a także proces ofertowania, który może zostać wykorzystany w działalności firmy Marani Sp. z o.o.

Rozdział 2 pt.: *Prototypowe jednostki ORC Marani* (11 stron) przedstawia opis prototypowych układów ORC opracowanych przez firmę Marani Sp. z o.o. we współpracy z Instytutem Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku. W rozdziale opisano szczegółowo konfigurację i zakres parametrów operacyjnych prototypowych układów Marani ORC10, ORC30 i ORC300. Określono też parametry źródeł ciepła odpadowego z którymi układy te współpracują.

Rozdział 3 pt.: *Przegląd literatury w zakresie optymalizacji układów ORC współpracujących z źródłami ciepła odpadowego* (2 strony) omawia metody i wyniki optymalizacji układów ORC przeznaczonych do odzysku ciepła odpadowego, które przedstawione zostały w publikacjach naukowych przez innych badaczy. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury zidentyfikowano i omówiono możliwe kierunki optymalizacji oraz dokonano przeglądu różnych kryteriów optymalizacji i funkcji celu.

Rozdział 4 pt.: *Model matematyczny dla wyznaczenia nominalnych parametrów układów ORC* (11 stron) przedstawia opis modelu matematycznego wykorzystywanego przez Autora do prowadzenia analiz układów ORC pracujących w warunkach nominalnych. Model ten stanowi zbiór zależności matematycznych oraz definiuje ich ograniczenia i warunki brzegowe. W rozdziale opisano cztery rozpatrywane przez Autora warianty technologiczne układów ORC, parametry termodynamiczne i wskaźniki techniczne określające stan pracy układu, procedurę optymalizacji i metody określania parametrów podzespołów układu (tj. turbiny i wymienników ciepła).

Rozdział 5 pt.: *Model matematyczny przy zmiennym obciążeniu* (3 strony) zawiera opis modelu matematycznego wykorzystywanego przez Autora do prowadzenia analiz pracy układów ORC w warunkach zmiennego obciążenia. Model ten został zdefiniowany jako zbiór równań matematycznych odnoszących się do pracy turbiny i wymienników ciepła.

Rozdział 6 pt.: *Efekt ekologiczny* (0,5 strony) zawiera opis przyjętego przez Autora sposobu określania unikniętych, dzięki zastosowaniu układów ORC, emisji substancji szkodliwych (CO₂, SO₂, NO_x, CO, pył) do atmosfery.

Rozdział 7 pt.: *Szacowanie kosztów układów ORC* (9 stron) przedstawia opis sposobu szacowania całkowitych kosztów układów ORC, na które składają się koszty czynnika roboczego, czynników pośredniczących, turbiny, generatora, wymienników ciepła, pomp, armatury oraz układów UPS i pomiarowego. W rozdziale odniesiono się do rzeczywistych kosztów poniesionych przez firmę Marani Sp. z o.o. na budowę prototypowego układu ORC.

Rozdział 8 pt.: *Studium przypadku* (10 stron) przedstawia opis i wyniki przeprowadzonej przez Autora analizy optymalizacyjnej. Autor podjął próbę wykorzystania opracowanego przez siebie oprogramowania optymalizacyjnego do przeprowadzenia analizy obliczeniowej dotyczącej prototypu Marani ORC30 i porównania uzyskanych wyników modelowania z danymi uzyskanymi na drodze modelowania tego samego układu ORC przez zespół Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku. Modelowanie przeprowadzono wyznaczając moc netto układu, sprawność netto układu, całkowity koszt wytworzenia układu, koszt wytworzenia układu w stosunku do zainstalowanej mocy netto, ciśnienie na wlocie do turbiny i przepływ czynnika roboczego. Uzyskane wyniki porównano następnie z wynikami modelowania tego samego układu ORC przy zastosowaniu modelu opracowanego przez Instytut Maszyn Przepływowych. Przedstawiono też uzyskany przy zastosowaniu modelu potencjalny zakres aplikacji układu. W konkluzji wskazano, że wykorzystanie opracowanych w ramach doktoratu narzędzi obliczeniowych umożliwiających analizę układu w nie nominalnych obciążeniach pozwala na określenie potencjalnego zakresu implementacji układu bez konieczności wprowadzania zmian konstrukcyjnych.

Rozdział 9 pt.: *Analiza wyników sesji pomiarowej oraz weryfikacja wyników modelu off-design* (4 strony) przedstawia porównanie danych eksperymentalnych pozyskanych w czasie badań prototypu Marani ORC30 z wynikami pozyskanymi na drodze modelowania przy wykorzystaniu oprogramowania opracowanego w ramach realizacji pracy doktorskiej. Analizowano wybrane parametry eksperymentalne zarejestrowane podczas sesji pomiarowej wykonanej na prototypie układu Marani ORC30. Parametrami tymi były: ciśnienie czynnika roboczego, temperatura czynnika roboczego, oleju termalnego i chłodziwa oraz przepływ oleju termalnego, czynnika roboczego i chłodziwa. Dla tego zbioru parametrów modelowano moc turbiny, moc pompy, moc netto układu ORC, sprawność turbiny i sprawność układu ORC i porównywano te wyniki z danymi uzyskanymi z badań eksperymentalnych.

Rozdział 10 pt.: *Wnioski* (2 strony) przedstawia wnioski z przeprowadzonej przez Autora analizy.

Rozdział 11 pt.: *Podsumowanie – wdrożeniowy charakter opracowanych narzędzi* (0,5 strony) przedstawia możliwy charakter wykorzystania wyników uzyskanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej w działalności wdrożeniowej firmy Marani Sp. z o.o. m.in. do szybkiego

opracowywania studiów wykonalności dla indywidualnych przypadków oraz wsparcie w procesie ofertowania.

Ostatnia część pracy to streszczenie w języku polskim i angielskim, spis rysunków, spis tabel oraz wykaz cytowanej literatury (77 pozycji).

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem i optymalizacją pracy układów ORC przeznaczonych do odzysku ciepła odpadowego. Tematyka ta jest istotna zarówno z naukowego jak i praktycznego punktu widzenia. Przedstawiony w pracy problem badawczy sprowadzał się do sformułowania modelu matematycznego umożliwiającego prowadzenie analiz optymalizacyjnych układów ORC. Model ten został zdefiniowany w oparciu o zbiór równań matematycznych obejmujących zagadnienia cieplne, przepływowe i ekonomiczne. W oparciu o model Autor rozprawy opracował oprogramowanie obliczeniowe w języku programowania Python, które następnie wykorzystał do analiz w obszarze modelowania i optymalizacji układu Marani ORC30, skonstruowanego w ramach współpracy firmy Marani Sp. z o.o. i Instytutu Maszyn Przepływowych PAN im. Roberta Szewalskiego.

Biorąc pod uwagę złożoność zagadnień związanych z modelowaniem, optymalizacją i konstrukcją układów konwersji energii oraz specyficzne wymagania dotyczące bezpieczeństwa pracy i oddziaływania środowiskowego układów ORC należy wskazać, że przedstawione w rozprawie zagadnienie jest problemem wielowątkowym o charakterze techniczno-naukowym. W związku z powyższym jego rozwiązanie wymaga od badacza dużej wiedzy m.in. z zakresu fizyki, matematyki, termodynamiki, wymiany ciepła i programowania oraz umiejętnego dobrania odpowiednich metod realizacji badań. Metody te obejmowały opracowanie modelu matematycznego układu ORC, jego implementację w języku programowania oraz modelowanie i optymalizację pracy układu ORC przy wykorzystaniu opracowanego oprogramowania.

Doktorant wykazał umiejętność korzystania ze światowych zasobów literatury. W pracy odniósł się do 77 pozycji literaturowych, z których wiele to artykuły opublikowane w ostatnim czasie w recenzowanych czasopiśmie posiadających współczynnik oddziaływania IF. Doktorant dokonał przeglądu literatury w obszarze źródeł ciepła odpadowego, modelowania układów ORC i metod ich optymalizacji dzięki czemu dobrze rozeznał bieżący stan wiedzy dotyczącej modelowania i optymalizacji układów ORC. Rozeznanie to pozwoliło mu na określenie tezy badawczej, kierunku, zakresu i programu realizacji prac będących przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Analizując rozprawę doktorską stwierdzam, że Doktorant wykazał, że potrafi sformułować problem badawczy oraz znaleźć stosowne narzędzia do jego rozwiązania jak i przeprowadzić analizę modelową oraz optymalizację problemu.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta należy uznać:

1. Przeprowadzenie analizy literatury w zakresie źródeł ciepła odpadowego występującego w polskim przemyśle i dokonanie oceny przydatności tych zasobów do wykorzystania w układach ORC,
2. Sformułowanie modelu matematycznego i optymalizacyjnego układów ORC zasilanych ciepłem odpadowym i przeprowadzenie serii obliczeń modelowych i optymalizacyjnych oraz porównanie ich wyników z danymi pozyskanymi z innych modeli i danymi eksperymentalnymi pochodzącymi z badań układów prototypowych,

3. Implementację opracowanego modelu matematycznego i optymalizacyjnego w oprogramowaniu, które może być wykorzystywane przez firmę przemysłową do prowadzenia wdrożeń układów ORC w przemyśle.

Część merytoryczna pracy ma charakter analizy techniczno-ekonomicznej o aspekcie wdrożeniowym i pod tym względem została opracowana prawidłowo, mam jednak prośbę do Doktoranta o wyjaśnienie lub doprecyzowanie następujących, dyskusyjnych kwestii:

1. Rozdział 1.3 zamieszczony na str. 25 wydaje się być niedokończony.
2. Na str. 31 w Tab. 1.7 zestawiono wybrane do analizy czynniki robocze. Jakimi kryteriami podyktowany był wybór właśnie tych substancji? Czy wg. Autora inne czynniki robocze mogłyby również znaleźć zastosowanie w przedstawionym zakresie temperatur źródeł ciepła odpadowego?
3. W rozdziałach 4, 5, 6 i 7 Autor przedstawia modele matematyczne, metody obliczeń i optymalizacji będące podstawą prowadzonych analiz oraz programu obliczeniowego. W treści tych rozdziałów ani w całej pracy nie przedstawiono jednak opisu działania tego oprogramowania ani jego kodu. Z treści pracy nie wynika też w sposób czytelny jaki jest wkład autorski Doktoranta w przedstawione w pracy modele matematyczne?
4. Równanie 4.1.65 na str. 59 przedstawia wielomian opisujący moc wieży chłodzącej. Z jakiego źródła pozyskano współczynniki i stałe występujące w tym równaniu?
5. Na str. 61 w rozdziale 4.3 Autor wskazuje, że „Zakłada się płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła pracujące w przeciwnym kierunku”. Czy były brane też pod uwagę inne typy wymienników ciepła o innym charakterze przepływu?
6. W rozdziale 8 przedstawiono wyniki przeprowadzonych przez Autora analiz obliczeniowych. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów kolumnowych na rys. 8.1-8.6. W tekście pracy brak jest jednak szczegółowego opisu i krytycznej dyskusji wyników tych analiz.
7. Na rys. 9.1-9.3 przedstawionych na str. 86 i 87 Autor prezentuje wybrane wyniki badań przeprowadzonych na prototypowym układzie Marani ORC30. Na niektórych charakterystykach pomiarowych widoczne są fluktuacje wartości mierzonych. Czym były one spowodowane?
8. W rozdziale 10 Autor przedstawia wnioski z przeprowadzonej przez siebie analizy, jednak ich nie hierarchizuje. Brak jest też odniesienia we wnioskach do postawionej w pracy tezy. Jaki jest wg. Autora najważniejszy wniosek z przeprowadzonych badań?
9. Często stosowanym i przydatnym narzędziem oceny układów energetycznych jest analiza egzergetyczna. Czy Autor próbował wykorzystywać w swoim modelu i oprogramowaniu obliczeniowym to narzędzie?

5. Uwagi szczegółowe dotyczące strony redakcyjnej pracy

Podczas lektury pracy zauważyć można, że była ona prawdopodobnie opracowana w pośpiechu na co wskazują liczne usterki o charakterze redakcyjnym obejmujące głównie potknięcia literowe, edytorskie i interpunkcyjne. Usterki te powodują, że lektura pracy jest trudna. Dodatkowo, wskazać należy na następujące nieścisłości, niedoprecyzowane sformułowania, usterki stylistyczne i błędy techniczne:

- a) W wielu miejscach w tekście pracy występuje brak przywołania przedstawianych rysunków i tabel oraz omówienia ich zawartości przez co, w niektórych przypadkach, dane te są trudne do interpretacji.
- b) W niektórych miejscach w tekście występują niedokończone zdania (p. np. str. 90).

- c) Występują błędy w numeracji równań matematycznych (p. np. rozdział 7).
- d) W rozdziale 1.1 Autor przedstawia przegląd technologii wykorzystania ciepła odpadowego. Warto byłoby rozważyć zestawienie poszczególnych technologii w podrozdziały.
- e) W rozdziale 3 Autor kontynuuje przegląd literatury dotyczący optymalizacji układów ORC. Warto byłoby rozważyć przedstawienie treści tego rozdziału wspólnie z rozeznaniem literatury z rozdziału 1.
- f) Zestawienie literatury jest opracowane w sposób nieujednolicony. Warto byłoby rozważyć stosowanie jednego formatu zapisu dla przytaczanych źródeł, np. ACS, AMA lub in.
- g) Modele matematyczne i obliczeniowe są przedstawione w rozdziałach 4, 5, 6 i 7. Warto byłoby rozważyć przedstawienie i omówienie wszystkich wykorzystywanych modeli obliczeniowych w jednym rozdziale. Mogłoby to poprawić czytelność pracy.

Wymienione wyżej uwagi krytyczne mają jedynie charakter porządkowy i nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Mogą być one pomocne Autorowi podczas przygotowywania przyszłych publikacji i opracowań naukowych.

6. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej Pan mgr inż. Arkadiusz Musiał wykazał, że potrafi wykorzystać dostępne w literaturze dane naukowe, sformułować model matematyczny i optymalizacyjny układu ORC, przeprowadzić modelowanie i analizę optymalizacyjną a następnie dyskusję i interpretację uzyskanych wyników i na ich podstawie sformułować wnioski. Przeprowadzone przez Doktoranta badania wnoszą wkład w rozwój narzędzi służących modelowaniu i optymalizacji układów ORC wykorzystujących ciepło odpadowe. Doktorant osiągnął wyniki o charakterze aplikacyjnym i wdrożeniowym.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Arkadiusza Musiała ma charakter odpowiadający wymaganiom tzw. doktoratów wdrożeniowych i spełnia w stopniu wystarczającym warunki określone w ustawie o stopniach i tytułach naukowych – Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz. U. 2022 r., poz. 574. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o przyjęcie pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Arkadiusza Musiała i dopuszczenie go do publicznej obrony.

16.01.2023

Piotr Kolesiński