

Wrocław, 16.01.2023

Prof. dr hab. inż. Piotr Kolasinski
Katedra Termodynamiki
i Odnawialnych Źródeł Energii
Politechnika Wroclawska
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 (CO_2 , SO_2 , 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 Szwalskiego.

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 doboru 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 czasopismach 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 przeciwnieprądzie”. 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

Podpisał Piotr Kolasiński

Wrocław, 02.06.2023

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

**Recenzja poprawionej i uzupełnionej
rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Arkadiusza Musiała
pt.: „Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC
zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych”**

Podstawą opracowania recenzji jest pismo nr RIE-BD.512.31.2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Rusina, z dnia 24.04.2023 informujące o potrzebie przeprowadzenia ponownej recenzji uzupełnionej i poprawionej 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”.

Poprawiona i uzupełniona rozprawa doktorska przedstawiona została na 124 stronach. Rozprawę podzielono na spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń, 9 rozdziałów, wykaz cytowanej literatury i załącznik zawierający najistotniejsze fragmenty kodu opracowanego przez Doktoranta oprogramowania obliczeniowego. W pracy zamieszczono 84 rysunki, 21 tabel, i 90 pozycji literatury.

W opinii z dnia 16.01.2023 nie wskazywałem na potrzebę poprawy rozprawy i biorąc pod uwagę, że jest to ponowna recenzja dysertacji nie będę powtarzał w całości uwag, które zawarłem w recenzji poprzedniej. Analizując tekst poprawionej i uzupełnionej rozprawy oraz załączony przez Doktoranta wykaz zmian zauważyć można, że wyeliminowano część wskazanych w mojej poprzedniej recenzji błędów o charakterze merytorycznym i redakcyjnym. Wprowadzone zmiany przyczyniły się do poprawy czytelności rozprawy i ułatwienia śledzenia prowadzonego przez Doktoranta wyводу. W tekście wciąż jednak można napotkać potknięcia o charakterze redakcyjnym (błędy literowe i in.) p. np. Rozdział 8.

W rozdziale 2 Doktorant przedstawił cel i zakres pracy oraz przeddefiniował, w porównaniu do wersji pierwotnej rozprawy, tezy badawcze. W obecnym brzmieniu tezy te wskazują na wdrożeniowy charakter prowadzonych prac i dotyczą opracowania konstrukcji prototypowych siłowni ORC zasilanych przemysłowym ciepłem odpadowym, kryteriów prowadzenia analizy optymalizacyjnej takich układów i opracowania narzędzia obliczeniowego przeznaczonego do wykorzystania w działaniach komercyjnych firmy Marani Sp. z o.o.

Dodano rozdział 5.4, w którym Doktorant omawia swój wkład własny w prace nad prototypami ORC. Z treści rozdziału wynika, że prace doktoranta dotyczyły m.in. prowadzenia przetargów, prac montażowych, udziału w rozruchu instalacji, analizy dokumentacji technicznej, itd. Doktorant wskazał, że głównym obszarem jego działalności było

opracowanie narzędzi obliczeniowych wspomagających rozwój projektów aplikacyjnych. Oprócz omówienia wkładu własnego w prace nad prototypami, wskazane byłoby też doprecyzowanie przez Doktoranta wkładu własnego w formułowanie modeli matematycznych, które zostały wykorzystane w opracowanym przez niego narzędziu obliczeniowym.

W treści poprawionej rozprawy zamieszczono nie ujęte w wersji wcześniejszej fragmenty kodu opracowanego przed Doktorantą oprogramowania obliczeniowego.

W rozdziale 8 Doktorant przedstawia wnioski z przeprowadzonych analiz w odniesieniu do przedstawionych w rozdziale 2 tez badawczych. Wskazuje, że w oparciu o uzyskane wyniki analizy ekonomicznej potwierdzić należy tezę 1 rozprawy dotyczącą możliwości opracowania w polskich warunkach siłowni ORC zasilanych ciepłem odpadowym, które spełniać będą kryterium opłacalności. Teza 2 rozprawy, dotycząca wyboru maksymalnej mocy elektrycznej netto układu ORC jako funkcji celu dla prowadzonej analizy optymalizacyjnej nie znalazła potwierdzenia na podstawie uzyskanych wyników. Doktorant wskazuje, że stosowanie tej funkcji celu jest zasadne jedynie w przypadku porównywania między sobą takich samych konfiguracji układów ORC. W wyniku przeprowadzonych prac Doktorant opracował narzędzie obliczeniowe w postaci oprogramowania umożliwiającego prowadzenie porównawczych analiz techniczno-ekonomicznych układów ORC o różnych konfiguracjach. Oprogramowanie to wykorzystał następnie do przeprowadzenia omawianych w pracy analiz. Udało się więc doktorantowi potwierdzić tezę 3 rozprawy dotyczącą możliwości opracowania narzędzia obliczeniowego przeznaczonego do wykorzystania w działaniach komercyjnych firmy Marani Sp. z o.o.

W recenzji z dnia 16.01.2023 wystosowałem uwagi dyskusyjne. Na część z nich znalazłem odpowiedź w poprawionej i uzupełnionej treści rozprawy. Mam jednak prośbę do Doktoranta o dodatkowe wyjaśnienia w zakresie następujących kwestii:

1. Na str. 45 w Tab. 4.7 zestawiono wyniki szacowania potencjału generowania energii elektrycznej w układach ORC przy wykorzystaniu źródeł ciepła odpadowego o różnym potencjale. Szacowanie zostało przeprowadzone dla wybranych czynników roboczych (R1234zeE, Izopentan, Cyklopentan i Toluen). 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?
2. Z treści pracy nie wynika w sposób czytelny jaki jest wkład autorski Doktoranta w przedstawione w pracy modele matematyczne.
3. Równanie 6.1.85 na str. 67 przedstawia wielomian opisujący moc wieży chłodzącej. Z jakiego źródła pozyskano współczynniki i stałe występujące w tym równaniu?
4. Na str. 69 w rozdziale 6.3 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?
5. W rozdziale 7 przedstawiono wyniki przeprowadzonych przez Autora analiz obliczeniowych. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów kolumnowych na rys. 7.4-7.10. W tekście rozdziału 7 brak jest jednak szczegółowego opisu i krytycznej dyskusji wyników tych analiz.
6. Na rys. 7.18-7.20 przedstawionych na str. 106 i 107 Autor prezentuje wybrane wyniki badań przeprowadzonych na prototypowym układzie Marani ORC30. Na niektórych charakterystykach pomiarowych widoczne są fluktuacje wartości mierzonych. Czym były one spowodowane?
7. W rozdziale 8 Autor przedstawia wnioski z przeprowadzonej przez siebie analizy. Jaki jest wg. Autora najważniejszy wniosek z przeprowadzonych badań?

8. Często stosowanym i przydatnym narzędziem oceny układów energetycznych jest analiza egzergetyczna. Na str. 33 Autor stwierdza, że „.... sprawność egzergetyczna wydaje się być lepszym kryterium optymalizacji układów ORC.” Czy Autor próbował wykorzystywać w swoim modelu i oprogramowaniu obliczeniowym analizę egzergetyczną?

Analizując poprawioną i uzupełnioną rozprawę doktorską stwierdzam, podobnie jak w recenzji z dnia 16.01.2023, że Doktorant wykazał, że potrafi sformułować problem badawczy oraz znaleźć stosowne narzędzia do jego rozwiązania jak i przeprowadzić analizę modelową oraz optymalizację problemu.

W związku z powyższym podtrzymuję konkluzję zawartą w recenzji z dnia 16.01.2023, w której stwierdziłem, że: 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.

Podpisał Piotr Kolasiński