

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielawicz, czł. koresp. PAN  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Energii  
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej  
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12  
tel. +58 347 2254  
email: [Dariusz.Mikielawicz@pg.edu.pl](mailto:Dariusz.Mikielawicz@pg.edu.pl)

Gdańsk, 30 grudnia 2022 r.

## R E C E N Z J A

### pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Musiała pt. "Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych "

wykonana na podstawie zlecenia z 15 listopada 2022 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka z dnia 20 października 2022 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jacek Kalina, prof. PŚI, a promotorem pomocniczym Łukasz Antczak.

#### 1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych*” została przygotowana w ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki Doktorat Wdrożeniowy II edycja. Dotyczy ona analiz możliwości zagospodarowania ciepła odpadowego różnej jakości (o różnych temperaturach) do produkcji energii elektrycznej wykorzystując obiegi Rankina z organicznym czynnikiem roboczym. Doktorant przeprowadził analizę trzech wariantów instalacji z obiegami ORC i na tej podstawie omówił zagadnienia związane z projektowaniem, doбором elementów instalacji i eksploatacją obiegów ORC.

Do przedstawionej w pracy analizy wykorzystano doświadczenia pozyskane przez Doktoranta na instalacjach wykonanych przez firmę Marani, jak również wiedzę literaturową z modelowania obiegów termodynamicznych wykorzystujących niskotemperaturowe ciepło odpadowe.

Moim pierwszym odczuciem przy lekturze pracy było to, że jej struktura jest nietypowa, a zarazem niewłaściwa dla prac doktorskich. Rozdziały wprowadzające do dysertacji powinny poprzedzać rozdziały będące własnym wkładem Doktoranta do rozprawy. Oznacza to, że po przedstawieniu wprowadzenia do tematyki, celu, zakresu i tezy pracy w jej dalszej części powinny być przedstawiane jedynie osiągnięcia własne. W przedmiotowej pracy tak niestety nie jest. Rozdział 1, który wprowadza Czytelnika w tematykę pracy, powinien być podzielony na większą liczbę rozdziałów, a cel, zakres i tezy pracy powinny stanowić osobny rozdział. Informacje przekazane w tej części są właściwie spójcjonowane w strukturze pracy.

Wątpliwie ulokowany jest dla mnie rozdział 3. Jest on nadal rozdziałem opisowym, sporządzonym na podstawie przeglądu literatury, a znajduje się w części, która powinna zawierać jedynie analizy związane z udowadnianiem tez pracy. Abstrahując od faktu niewłaściwej struktury pracy mogę stwierdzić, że przedmiotowa praca jest dobrym poradnikiem jak przygotować się do zaprojektowania, doboru elementów a następnie eksploatacji instalacji ORC. Można powiedzieć, że pierwszy rozdział pracy jest rzeczywiście rozdziałem przeglądowym, w którym Czytelnik jest wprowadzony do tematyki technologii ORC. W kolejnych częściach Doktorant przybliży Czytelnikowi zasady modelowania układów energetycznych, budowę modeli symulacyjnych układów oraz modelowanie empiryczne. Praca liczy łącznie 101 stron, z czego na część pierwszą (rozdział 1), wprowadzającą do tematyki pracy, przypadają 38 strony, a rozdział 3 ma 2 strony. Praca zawiera 11 rozdziałów i spis literatury oraz spis rysunków i tabel (nie wymienionych w spisie treści). Literatura wykazana jest w łącznej liczbie 77 pozycji, z czego 1 praca jest współautorstwa Doktoranta.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki potencjału i możliwości wykorzystania ciepła odpadowego na świecie jak i w Polsce. Przedstawione są klasyfikacje czynników roboczych do pracy w układach ORC jak również ograniczenia w stosowaniu tych obiegów. Doktorant omawia współpracę górnego źródła ciepła z wytwornicą pary w obiegu ORC. Przedstawione są tezy badawcze pracy oraz cel i jej zakres.

W **rozdziale drugim** omawia prototypowe jednostki ORC wyprodukowane przez firmę Marani. Są to trzy różne prototypy o mocy elektrycznej około 10, 30 i 300 kWe. Instalacja Marani ORC10 dotyczy instalacji współpracującej ze źródłem ciepła o temperaturze ok. 80°C z R1233zd jako czynnikiem roboczym, Marani ORC30 współpracuje ze źródłem o temperaturze ok. 500°C i toluenem jako czynnikiem roboczym, i w końcu Marani ORC300 współpracuje ze źródłem ciepła o temperaturze 400°C oraz olejem silikonowym MM jako czynnikiem roboczym. Doktorant podkreśla fakt, że wspomniane „...prototypy powstały przy współpracy z IMP PAN w Gdańsku, który pierwotnie odpowiadał za prace koncepcyjne, w tym optymalizację termodynamiczną, wybór docelowych rozwiązań technicznych oraz szczegółowy projekt turbiny”. Takie postawienie sprawy zawęża jakościowo osiągnięcia naukowe przedmiotowej pracy. Firma produkcyjna Marani, w ramach projektu wdrożeniowego prowadzącego do opracowania typoszeregu instalacji ORC postawiła jedynie wymagania pozanaukowe w postaci możliwie kompaktowych konstrukcji instalacji do zastosowań w ograniczonych przestrzeniach oraz opłacalność ekonomiczną. W wyniku powstały założenia dla firmy Marani „... wykorzystania w obecnych i przyszłych projektach suchych czynników roboczych oraz hermetycznych, zintegrowanych z generatorami wysokoobrotowych turbin, z łożyskami smarowanymi czynnikiem roboczym”. Jest to bardzo ogólne stwierdzenie. Tego typu zalecenia techniczne są ogólnie znane i stosowane w praktyce. Poza tym w przedmiotowej pracy Doktorant opiera się na trzech prototypach urządzeń, w których powstaniu niewiadomy jest wkład Doktoranta. Każde z nich stosuje jako płyn roboczy płyn suchy. Z lektury rozdziału nie wynika także udział merytoryczny Doktoranta w prowadzonych pracach eksperymentalnych, co więcej sposób przedstawiania zagadnienia wskazuje, że Doktorant w tych pracach nie uczestniczył. Świadczy o tym fakt, że przedstawione są schematy rozpatrywanych instalacji, a nie ma przedstawionych na przykład charakterystyk pracy tych urządzeń. W pracy kwalifikacyjnej jaką jest praca doktorska takie elementy aktywności Doktoranta powinny być precyzyjnie ujęte.

W **rozdziale trzecim** Doktorant przedstawia przegląd literatury związany z optymalizacją układów ORC pracujących ze źródłami ciepła odpadowego. Pomijając fakt, że jest to rozdział dwustronicowy to przegląd ten jest ciekawy i przedstawia szereg podejść do zagadnienia optymalizacji pracy układu ORC. Po lekturze rozdziału czytelnik odczuwa niedosyt spowodowany faktem, że brak jest jakiegokolwiek podsumowania tej części pracy oraz jego

wpływu na dalsze aktywności doktoranta. Uważam także, co jeszcze raz podkreślam, że rozdział taki powinien się pojawić się przed postawieniem tezy pracy.

**Rozdział czwarty** przedstawia model matematyczny dla wyznaczania nominalnych parametrów pracy instalacji ORC. Doktorant wprowadza na określenie konfiguracji obiegu termodynamicznego nowe określenie pod nazwą „struktura technologiczna”. Posługuje się tym określeniem jakby była to ogólnie przyjęta w terminologii dotyczącej obiegów termodynamicznych definicja. Autor dysertacji omawia po prostu cztery konfiguracje obiegów ORC, czyli obieg z bezpośrednim dostarczaniem ciepła do parownika bez regeneracji oraz z regeneracją oraz takie same dwie konfiguracje, przy czym doprowadzanie ciepła do parownika obiegu ORC odbywa się za pomocą płynu pośredniczącego w postaci oleju termalnego. Są to typowe konfiguracje, które analizowane są w podobnych przypadkach. Nie powinno się tu zmieniać ogólnie zaakceptowanej terminologii. Z kolei przedstawiony model matematyczny to wykaz równań bilansowych do wyznaczania wymaganych wielkości związanych z obiegiem. Poza przedstawieniem schematu ideowego obiegów bardzo pomocny w analizie byłby schemat, w którym pokazane są punkty węzłowe obiegu, żeby przedstawione równania były bardziej zrozumiałe. Również przedstawienie graficzne algorytmu obliczeń ułatwiłoby percepcję pracy. W obecnej formie jedynie specjalista z obszaru obiegów termodynamicznych jest sobie w stanie poradzić ze zrozumieniem zastosowanej procedury. W świetle faktu, że w opinii Doktoranta osiągnięciem pracy jest program obliczeniowy, to należałoby go przedstawić w pracy w postaci schematu blokowego obliczeń oraz dołączyć wydruk do pracy w postaci załącznika. Doktorant stosuje różnego rodzaju skróty myślowe. Na przykład w opisie modelu matematycznego obiegu w procedurze obliczeniowej pojawia się chłodnia kominowa, bez żadnego komentarza. Oczywiście zastosowanie chłodni kominowej w instalacji ORC jest jednym z możliwych rozwiązań, ale trzeba dopowiedzieć dla jakiego rozpatrywanego przypadku się to tyczy i czy rzeczywiście miało takie zastosowanie miejsce w którymś z analizowanych wariantów. Chciałbym podkreślić fakt, że prezentacja niewątpliwie ciekawego zagadnienia instalacji ORC zrobiona jest bardzo nieprecyzyjnie, co niestety ma wpływ na percepcję pracy. Np. wzorem (4.1.65) Doktorant opisuje moc przeznaczoną do pracy chłodni kominowej bez podawania źródła tej zależności. A zdanie za wzorem (4.1.67) jest niezrozumiałe, gdyż cytuję "Chłodnia wentylatorowa czy może zostać pominięta, gdy układ ORC będzie korzystał z już istniejącego systemu chłodzenia." Z kolei rozdział 4.3 dotyczy obliczenia powierzchni wymiany ciepła. Nie ma w tytule rozdziału odniesienia do jakiego elementu instalacji ma to równanie być zastosowane. Autor nadmienia jedynie, że stosuje metodę LMTD do wymienników płaszczowo-rurowych pracujących w przeciwnym kierunku. Korzysta ze wzorów (4.3.1)-(4.3.3), bez podawania ich źródła pochodzenia jak również schematu rozpatrywanego wymiennika. Jest to zdecydowanie niekompletne potraktowanie zagadnienia wprowadzając czytelnika w wątpliwość. We wzorze (4.3.26) przedstawia współczynnik wnikania ciepła w przypadku zmiany stanu skupienia nie określając, czy dotyczy on wrzenia w przepływie czy kondensacji w przepływie, czy może sytuacji odnoszącej się do wrzenia w objętości czy kondensacji na rurkach. Czytelnik nie powinien mieć żadnych wątpliwości w tym zakresie. Może zajść sytuacja, że wartości wyznaczonych współczynników przejmowania ciepła niewiele się od siebie różnią, ale jako że mówimy w pracy o ogólnym algorytmie wyznaczania powierzchni wymiany ciepła i nieuprawnionym jest mowa, że jednym równaniem korelacyjnym można obsłużyć cztery możliwości. Jest to poważne uchybienie pracy. W obliczeniach porównawczych, przedstawionych w rozdziale 8.2 jest mowa o dużych rozbieżnościach między obliczeniami wykonanymi przez IMP PAN i Doktoranta. Błędne modelowanie wrzenia i kondensacji w przepływie mogło się do tego wydatnie przyczynić.

**Rozdział piąty** przedstawia model matematyczny przy zmiennym obciążeniu. Jest to rozdział dwustronicowy, który w opinii Doktoranta „został opracowany jako uniwersalny, z wykorzystaniem korelacji literaturowych z opcją ich zastąpienia charakterystykami

konkretnych komponentów.” Po raz kolejny przedstawiona jest sekwencja wzorów bez odniesienia do źródeł ich pochodzenia, co sprawia, że są praktycznie nieweryfikowalne. Wzór (5.2) zawiera współczynniki a-f, których wartości są podane w opisie wzorów, niemniej samo stwierdzenie, że dotyczą „turbin jednostopniowych turbin osiowych” (zauważmy po raz kolejny styl wypowiedzi Doktoranta) jest niepoważnym potraktowaniem czytelnika.

**Rozdział szósty** dotyczy wyznaczenia efektu ekologicznego, który praktycznie składa się z jednej tabeli, w której pokazano wskaźniki emisji zanieczyszczeń dla produkcji energii elektrycznej opartej o procesy spalania w roku 2020. Wyodrębnianie tego typu skromnych tekstowo rozdziałów w pracach kwalifikacyjnych jest nieporozumieniem. Rozdział ten powinien stanowić podrozdział w rozdziale omawiającym skutki ekologiczne, ekonomiczne i inne rozpatrywane w pracy.

**Rozdział siódmy** to przedstawienie kosztów układów ORC. Jest to jeden z ciekawszych wątków poruszanych w rozprawie. Oszacowano w funkcji ilości czynnika koszty czynnika roboczego (toluenu), oleju termalnego czy glikolu. Oczywiście mamy znowu do czynienia z brakiem informacji z jakich ofert korzystał Doktorant i nie ma żadnych odnośników literaturowych. Kolejno Doktorant opracował zależności dotyczące kosztu turbiny, generatora energii elektrycznej, ekonomizera, parownika i skraplacza, regeneratora oraz pomp. Poza kosztami turbiny, które opracował na podstawie własnych danych zakładu, pozostałe wyżej wymienione elementy mają odniesienie do jednej pozycji literaturowej, w której koszty niekoniecznie są miarodajne. Doktorant oszacował także dodatkowe koszty instalacji tak, że w efekcie końcowym jego koszt całkowity jest funkcją 26 składowych.

**Rozdział ósmy** to studium przypadku, w którym Doktorant porównuje instalację Marani ORC30 z instalacją opracowaną przez IMP PAN. W podrozdziale 8.1 przedstawiono obliczenia za pomocą własnego modelu obliczeniowego dla sześciu czynników roboczych oraz wybranych parametrów zasilania układu celem wyznaczenia optymalnego rozwiązania kierując się mocą netto układu ORC jako kryterium optymalizacyjnym. Wyniki przedstawiono na 9 wykresach, bez obszerniejszej analizy. Rozczarowuje to czytelnika, gdyż przeprowadzono szereg obliczeń i można było spodziewać się ciekawej dyskusji. A tak wynikiem ciekawość czytelnika pozostała niezaspokojona. Rozdział 8.2 to porównanie wyników obliczeń z obliczeniami IMP PAN. Całkowicie niezadowolająca jest dyskusja do porównania dwóch instalacji. Dla takich samych warunków porównania wyniki też powinny być porównywalne. Niezrozumiałe jest dla mnie, że tak duże rozbieżności pozostają bez komentarza. W takich przypadkach należałoby przeprowadzić bardziej szczegółowe analizy celem identyfikacji rozbieżności. Stwierdzenie, że „... pomimo występujących różnic znajdują się one na podobnym poziomie” jest niestosowne dla przypadku realizacji pracy kwalifikacyjnej, w ramach której kandydat powinien wykazać daleko dalej idące kompetencje analizy danej tematyki.

**Rozdział dziewiąty** to weryfikacja zgodności modelu off-design z pomiarami. Wykorzystywany jest własny model w stanach poza nominalnych, ale traktowanych jako stany ustalone. Oczywiście można się silić o tego typu porównania, ale ilościowo powinno się spodziewać znacznych rozbieżności, a przypadkowa zgodność nie jest miarodajna.

**Rozdział dziesiąty** to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski. Wnioski mają charakter obserwacji z przeprowadzonych eksperymentów. Głównym wnioskiem z pracy jest zauważenie, że zastosowanie regeneracji w obiegu wyraźnie zwiększa maksymalną moc netto układu, a zastosowanie pętli pośredniczącej w dostarczaniu ciepła ma wpływ odwrotny na moc generowaną w układzie (za wyjątkiem oleju silikonowego MM) Wniosek ten wynika bezpośrednio z temperatur dostarczania ciepła do obiegu ORC, bezpośrednio wykorzystane spaliny mają temperaturę zdecydowanie wyższą niż olej termalny. Większość pozostałych wniosków związanych ze sprawnością cieplną poszczególnych konfiguracji jest oczywista

i wynika z drugiej zasady termodynamiki. Oryginalne są wnioski związane z kosztami inwestycyjnymi i tę część pracy uważam za najbardziej interesującą.

**Rozdział jedenasty** to podsumowanie wyników pracy i przedstawienie wdrożeniowego charakteru opracowanych narzędzi. Wynika z niego, że opracowane w pracy narzędzia obliczeniowe umożliwią firmie Marani szybkie i efektywne wykonywanie studiów wykonalności dla indywidualnych przypadków oraz wsparcie w procesie ofertowania.

## 2. Tezy badawcze pracy

Doktorant w swojej pracy stawia następującą tezę badawczą:

*Efektywność energetyczna, ekonomiczna i ekologiczna odzysku ciepła odpadowego na potrzeby produkcji energii elektrycznej w modułowych układach siłowni, pracujących według obiegu Clausiusa-Rankine'a czynnika organicznego (ORC) jest zależna od doboru struktury technologicznej układu, czynnika roboczego, parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych i możliwe jest takie dostosowanie wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych, które w danych warunkach aplikacyjnych zapewni efekt optymalny.*

Teza ta jest w części pierwszej, tj. „Efektywność ... jest zależna od doboru struktury technologicznej układu, czynnika roboczego, parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych” jest oczywista i nie wymaga badań. W części drugiej tezy stwierdzenie, tj. „...możliwe jest takie dostosowanie wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych, które w danych warunkach aplikacyjnych zapewni efekt optymalny” jest merytorycznie niepoprawne, gdyż Doktorant nie podaje kryterium optymalności, według którego ocenia poszczególne układy, co jest kluczowe w tak postawionym zagadnieniu. Po zapoznaniu się z lekturą pracy domyślałem się, że chodzi mu o maksymalną moc netto układu ORC dla danych parametrów wykorzystywanego ciepła odpadowego.

W ramach przeprowadzonych analiz za pomocą własnego modelu matematycznego oraz porównaniach z posiadanymi danymi eksploatacyjnymi z rzeczywistych prototypów ORC Doktorant wykazuje prawdziwość postawionych tez i dokumentuje je wynikami zamieszczonymi w pracy.

## 3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie trudno znaleźć oryginalne osiągnięcia pracy. Przedstawiona do oceny praca to bardziej raport z badań prototypów instalacji ORC niż rozprawa doktorska. Jeżeli już miałbym coś wypunktować to wskazałbym następujące elementy:

1. zebranie danych dotyczących ciepła odpadowego w Polsce w świetle jego możliwości dalszego wykorzystania, czyli w podziale na poziomy temperaturowe,
2. opracowanie korelacji szacujących koszty poszczególnych podzespołów i nośników ciepła w instalacji ORC, które rzeczywiście będą przydatne dla firmy,
3. opracowanie wyników obliczeń i badań, dyskusja wyników i zalecenia do przyszłych prac.

## 4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się przede wszystkim wartościami użytkowymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistych prototypów instalacji ORC zbudowanych przez firmę Marani. Zaproponowane niewysublimowane narzędzia badawcze umożliwiają analizę takich obiektów, a przy małych modyfikacjach również i innych

podobnych obiektów, oczywiście tylko dla płynów roboczych ujętych w dotychczasowej analizie. Rozszerzenia na inne płyny robocze będą wymagały uzupełnienia programu o koszty związane z dodatkowymi płynami. Szczególnie wartościowe dla firmy, w którą zaangażowany jest doktorat jest szacowanie kosztów układów ORC, które odbywają się równolegle z obliczeniami. Projektowanie tego typu elementów instalacji bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki.

## 5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest wartościowa pod względem użytkowym, niemniej nie wnosi dużej oryginalności do zagadnień modelowania obiegu termodynamicznego. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt prowadzenia przez Doktoranta wdrożenia instalacji ORC, które w warunkach krajowych jest oryginalne. Dotychczas prowadzone były podobne próby na instalacjach prototypów w laboratoriach uczelni i instytutów badawczych. Przedstawiony model matematyczny instalacji ORC jest klasycznym podejściem do wyznaczania poszczególnych elementów instalacji i nie znajduje tu elementów nowatorskich. Praca napisana jest zwięźle i zapoznaje czytelnika z informacjami koniecznymi do pełnego rozpoznania zagadnienia doboru instalacji ORC do danych parametrów cieplnych zasilania obiegu. W części dokonań własnych ma tak naprawdę charakter raportu z badań trzech instalacji ORC oraz jedno porównanie obliczeniowe z podobną instalacją zaprojektowaną w IMP PAN. Nie jest niestety określony wkład własny Doktoranta w realizację poszczególnych elementów pracy. Ile w niej jest zaczerpnięte z raportów IMP PAN, a co jest wkładem własnym Doktoranta. Praca jest zilustrowana wykresami i rysunkami, których dyskusja, w mojej opinii pozostawia wiele do życzenia. Niespełnione są wymagania związane z wykazaniem własnych kompetencji w tematyce pracy. Zaproponowane i zastosowane metody analizy obiegu termodynamicznego obiegu ORC są kompleksową metodyką przeprowadzania takich analiz ze względu na dodatkowe uwzględnienie kosztów inwestycyjnych. Zgodnie z ustawą, przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, lub oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej. Korzystnym dla przedmiotowej pracy byłoby włączenie analizy egzergetycznej dla poszczególnych wariantów lub wykazanie, że warunki pracy tych obiegu spełniają kryteria optymalizacyjne z literatury, która w tych aspektach jest bardzo obfita. Przedstawiona analiza stanowi istotny wkład do problematyki eksploatacyjnej związanej z rozwojem układów ciepło-przepływowych w instalacjach przemysłowych. Potwierdzone jest to także przez jedną publikację w czasopiśmie krajowym.

Muszę nadmienić, że jestem rozczarowany stroną edytorską i stylistyczną pracy, co dodatkowo utrudnia analizę jej wartości merytorycznej. Przedstawiona mi do oceny jej wersja zawiera szereg błędów „literówkowych”, jak również i w terminologii oraz stylu prezentacji wyników. Zdaniem recenzenta język rozprawy nie odpowiada standardom prac doktorskich i powinien zostać poprawiony. Praca doktorska jest recenzowanym materiałem ogólnie dostępnym i jej standard edytorski również podlega ocenie. Co więcej formatowanie pracy również odbiega od ogólnie przyjętych zasad (np. numeracja wzorów jest różna w poszczególnych rozdziałach, która w pracy jest przedstawiona na drugim lub trzecim poziomie od głównego, np. (1.1) czy (1.1.1)). Bibliografia także nie spełnia jednolitego standardu. Inicjały imion mieszane są z pełnymi imionami, czasami imię jest przed nazwiskiem, czasami po. Uważam, że wersja końcowa pracy nie została odpowiednio czytana przez Doktoranta, co znacznie pogarsza jej odbiór oraz czytelność. W mojej ocenie praca zawiera także wątpliwości merytoryczne, do których odniosłem się w części opisowej pracy, szczególnie mówiąc o

wyznaczaniu powierzchni wymiany ciepła, czyli parownika i skraplacza. Chciałbym się uważnie przyglądać obliczeniom w tych wymiennikach, żeby uniknąć dwuznaczności.

## 6. Wniosek końcowy

Reasumując, w obecnej postaci praca wymaga korekt, które w podstawowej wersji przekazuję poniżej:

1. W pracy brak jest oryginalności naukowych, które mogą prowadzić do uogólnień. Należy więc wyodrębnić takie elementy, które wskażą na tego typu osiągnięcia.
2. Konieczne też jest uwypuklenie własnego wkładu w realizację prac nad prototypami instalacji ORC zarówno pod kątem naukowym jak i wdrożeniowym.
3. Opis matematyczny równań bilansowych instalacji ORC jest właściwy. Niemniej model korzysta z informacji literaturowych, a Autor nie posługuje się w większości przypadków odniesieniami do stosownej bibliografii, skąd pochodzą poszczególne zależności wykorzystywane w modelowaniu. Wydruk programu powinien być załącznikiem do pracy.
4. W pracy znajdują się liczne błędy edytorskie, których nie wymieniam ze względu na ich obfitość. Cała praca powinna zostać jeszcze raz solidnie przeczytana celem pozbycia się nich.
5. Praca znacznie zyskałaby na jakości gdyby posiadała przeprowadzoną analizę egzergetyczną poszczególnych wariantów – byłoby to wzmocnienie jakości naukowej pracy – do rozważenia.

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca nie może stanowić rozprawy doktorskiej w swej obecnej postaci. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania obiegów termodynamicznych, ale wymaga ona uzupełnienia o przynajmniej kwestie poruszone w punktach 1-4 powyżej. Dodatkowo, struktura pracy powinna być jeszcze raz przemyślana i ewentualnie poprawiona. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy dotyczący instalacji ORC, niemniej jego uzupełnienie o dokonania w tej materii przez inne ośrodki krajowe znacznie wzmocniłoby jego jakość. Po wprowadzeniu zaproponowanych modyfikacji, a może i dodatkowych własnych przemyśleniach, praca powinna być jeszcze raz zrecenzowana celem dopuszczenia jej do dalszych kroków w postępowanie w przewodzie doktorskim.

Podpisał Dariusz Mikielewicz

30.12.2022

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielewicz, czł. koresp. PAN  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa  
Instytut Energii  
Zakład Systemów i Urządzeń Energetyki Ciepłej  
80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12  
tel. +58 347 2254  
email: [Dariusz.Mikielewicz@pg.edu.pl](mailto:Dariusz.Mikielewicz@pg.edu.pl)

Gdańsk, 18 maja 2023 r.

## R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Musiała pt.  
**"Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych "**

wykonana na podstawie zlecenia z 24 kwietnia 2023 r. Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina, zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo, Energetyka z dnia 20 kwietnia 2023 r. Jest to druga recenzja pracy, która została wcześniejszą recenzją skierowana przeze mnie do korekty.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jacek Kalina, prof. PŚl, a promotorem pomocniczym Łukasz Antczak.

### 1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Optymalizacja parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych siłowni ORC zasilanej ciepłem odpadowym z procesów przemysłowych*” została przygotowana w ramach programu Ministerstwa Edukacji i Nauki Doktorat Wdrożeniowy II edycja. Dotyczy ona analiz możliwości zagospodarowania ciepła odpadowego różnej jakości (o różnych temperaturach) do produkcji energii elektrycznej wykorzystując obiegi Rankina z organicznym czynnikiem roboczym. Doktorant przeprowadził analizę trzech wariantów instalacji z obiegami ORC i na tej podstawie omówił zagadnienia związane z projektowaniem, doбором elementów instalacji i eksploatacją obiegów ORC.

Do przedstawionej w pracy analizy wykorzystano doświadczenia pozyskane przez Doktoranta na instalacjach wykonanych przez firmę Marani, jak również wiedzę literaturową z modelowania obiegów termodynamicznych wykorzystujących niskotemperaturowe ciepło odpadowe.

Poprawiona wersja pracy jest zdecydowanie bardziej czytelna i przejrzysta biorąc pod uwagę fakt, że poprzednia wersja pracy odbiegała standardem od klasycznych układów prac doktorskich. Mimo wszystko podtrzymuję swoje stanowisko, że w pracy doktorskiej rozdziały wprowadzające do dysertacji powinny poprzedzać rozdziały będące własnym wkładem Doktoranta do rozprawy. Oznacza to, że po przedstawieniu wprowadzenia do tematyki, celu, zakresu i tez pracy w jej dalszej części powinny być przedstawiane jedynie osiągnięcia własne. W przedmiotowej pracy tak niestety nie jest. Po rozdziale 1, który wprowadza Czytelnika w

tematykę pracy, wprowadzono rozdział 2 przedstawiający cel, zakres i tezy pracy. Wątpliwie ulokowane są dla mnie rozdziały 3 i 4. Są one nadal rozdziałami opisowymi, sporządzonymi na podstawie przeglądu literatury, a znajdują się w części, które powinny zawierać jedynie analizy związane z udowadnianiem tez pracy. Abstrahując od faktu niewłaściwej struktury pracy mogę stwierdzić, że przedmiotowa praca jest dobrym poradnikiem jak przygotować się do zaprojektowania, doboru elementów a następnie eksploatacji instalacji ORC. Można powiedzieć, że pierwszy rozdział pracy jest rzeczywiście rozdziałem, w którym Czytelnik jest wprowadzony do tematyki technologii ORC. W kolejnych częściach Doktorant przybliży Czytelnikowi zasady modelowania układów energetycznych, budowę modeli symulacyjnych układów oraz modelowanie empiryczne. Praca liczy łącznie 136 stron (poprzednio 101 stron), z czego na część pierwszą (rozdział 1), wprowadzającą do tematyki pracy, przypada 25 stron. Praca zawiera 9 rozdziałów, spis literatury oraz spis rysunków i tabel (nie wymienionych w spisie treści). Do pracy dołączono wydruk istotnych fragmentów programu obliczeniowego. Literatura wykazana jest w łącznej liczbie 90 pozycji, z czego 1 praca jest współautorstwa Doktoranta.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki potencjału i możliwości wykorzystania ciepła odpadowego na świecie jak i w Polsce. Przedstawione są klasyfikacje czynników roboczych do pracy w układach ORC jak również ograniczenia w stosowaniu tych obiegów. Doktorant omawia współpracę górnego źródła ciepła z wytwornicą pary w obiegu ORC.

W **rozdziale drugim** przedstawione są tezy badawcze pracy oraz cel i jej zakres.

W **rozdziale trzecim** Doktorant przedstawia przegląd literatury w zakresie optymalizacji układów ORC współpracujących ze źródłami ciepła odpadowego. W obecnej postaci jest to bardzo kompetentnie przeprowadzony przegląd wraz z przedstawionymi ograniczeniami. Niemniej Doktorant nie wyróżnia żadnego z kryteriów oceny pracy układów ORC ze względu na ich optymalność. Ostatnie zdanie rozdziału, po którym czytelnik przechodzi do dalszej lektury stwierdza, że sprawność egzotermiczna wydaje się być lepszym kryterium optymalizacji układów ORC niż kryterium sprawności termodynamicznej czy stopnia zagospodarowania strumienia ciepła odpadowego.

W **rozdziale czwartym** Doktorant przedstawia ocenę potencjału produkcji energii elektrycznej w układach ORC napędzanych energią odpadową w polskim przemyśle. Rozdział ten jest interesujący i przedstawia opracowanie danych literaturowych, z których wynika potencjał do wykorzystania do produkcji energii elektrycznej z różnych poziomów temperaturowych ciepła odpadowego. Uważam także, co jeszcze raz podkreślam, że rozdział taki powinien się pojawić się przed postawieniem tezy pracy.

W **rozdziale piątym** omawia prototypowe jednostki ORC wyprodukowane przez firmę Marani. Są to trzy różne prototypy o mocy elektrycznej około 10, 30 i 300 kW<sub>e</sub>. Instalacja Marani ORC10 dotyczy instalacji współpracującej ze źródłem ciepła o temperaturze ok. 80°C z R1233zd jako czynnikiem roboczym, Marani ORC30 współpracuje ze źródłem o temperaturze ok. 500°C i toluenem jako czynnikiem roboczym, i w końcu Marani ORC300 współpracuje ze źródłem ciepła o temperaturze 400°C oraz olejem silikonowym MM jako czynnikiem roboczym. Doktorant podkreśla fakt, że wspomniane „...prototypy powstały przy współpracy z IMP PAN w Gdańsku, który pierwotnie odpowiadał za prace koncepcyjne, w tym optymalizację termodynamiczną, wybór docelowych rozwiązań technicznych oraz szczegółowy projekt turbiny”. Celem doprecyzowania własnego wkładu do przedstawionych rozwiązań Doktorant w sposób jawny przedstawia swoje udziały w pracach, co zdecydowanie ułatwia recenzentowi zadanie oceny rzeczywistego wkładu pracy Doktoranta do omówionych wcześniej prototypów. Takie postawienie sprawy naświetla rzeczywiste osiągnięcia naukowe i techniczne przedmiotowej pracy. Chciałbym w tym miejscu podkreślić fakt, że wymieniając swoje aktywności wpływające na realizację tez pracy należało by najpierw zacząć od

wymienienia aktywności naukowych, poprzez wdrożeniowe dochodząc do elementów związanych z pozyskiwaniem poszczególnych części i podzespołów do instalacji.

W rozdziale szóstym przedstawiono model matematyczny dla wyznaczania nominalnych parametrów pracy instalacji ORC wraz z procedurami optymalizacyjnymi. Doktorant wprowadza na określenie konfiguracji obiegu termodynamicznego nowe określenie pod nazwą „struktura technologiczna”. Posługuje się tym określeniem jakby była to ogólnie przyjęta w terminologii dotyczącej obiegów termodynamicznych definicja. Autor dysertacji omawia po prostu cztery konfiguracje obiegów ORC, czyli obieg z bezpośrednim dostarczaniem ciepła do parownika bez regeneracji oraz z regeneracją oraz takie same dwie konfiguracje, przy czym doprowadzanie ciepła do parownika obiegu ORC odbywa się za pomocą płynu pośredniczącego w postaci oleju termalnego. Są to typowe konfiguracje, które analizowane są w podobnych przypadkach. Nie powinno się tu zmieniać ogólnie zaakceptowanej terminologii. Przedstawiony model matematyczny to wykaz równań bilansowych do wyznaczania wymaganych wielkości związanych z obiegiem. Poza przedstawieniem schematu ideowego obiegów bardzo pomocny w analizie byłby schemat, w którym pokazane są punkty węzłowe obiegu, żeby przedstawione równania były bardziej zrozumiałe. Również przedstawienie graficzne algorytmu obliczeń ułatwiłoby percepcję pracy. W obecnej formie jedynie specjalista z obszaru obiegów termodynamicznych jest sobie w stanie poradzić ze zrozumieniem zastosowanej procedury. W opinii Doktoranta, ale też i moim, osiągnięciem pracy jest program obliczeniowy. W obecnej wersji jest on przedstawiony w pracy oraz dołączono jego wydruk w postaci załącznika. Liczne niedociągnięcia stylistyczne i językowe zostały poprawione przez Doktoranta. Procedura obliczania wymienników ciepła została gruntownie poprawiona w obecnej wersji pracy. Jest ona spójna i zrozumiała dla Czytelnika.

W rozdziale przedstawiono także model matematyczny przy zmiennym obciążeniu. Jest to model, który został opracowany jako uniwersalny, z wykorzystaniem korelacji literaturowych z opcją ich zastąpienia charakterystykami konkretnych komponentów. Po raz kolejny przedstawiona jest sekwencja wzorów bez odniesienia do źródeł ich pochodzenia, co sprawia, że są praktycznie nieweryfikowalne. Wzór (6.4.2) zawiera współczynniki a-f, których wartości są podane w opisie wzorów, bez odniesienia do źródła informacji.

Kolejną informacją przekazaną w tym rozdziale jest szacowanie kosztów układów ORC. Jest to jeden z ciekawszych wątków poruszanych w rozprawie. Oszacowano w funkcji ilości czynnika koszty czynnika roboczego (toluenu), oleju termalnego czy glikolu. Oczywiście mamy znowu do czynienia z brakiem informacji z jakich ofert korzystał Doktorant i nie ma żadnych odnośników literaturowych. Kolejno Doktorant opracował zależności dotyczące kosztu turbiny, generatora energii elektrycznej, ekonomizera, parownika i skraplacza, regeneratora oraz pomp. Poza kosztami turbiny, które opracował na podstawie własnych danych zakładu, pozostałe wyżej wymienione elementy mają odniesienie do jednej pozycji literaturowej, w której koszty niekoniecznie są miarodajne. Doktorant oszacował także dodatkowe koszty instalacji tak, że w efekcie końcowym jego koszt całkowity jest funkcją 26 składowych.

W rozdziale przedstawiono obliczenia efektu ekologicznego, składającego się z jednej tabeli, w której pokazano wskaźniki emisji zanieczyszczeń dla produkcji energii elektrycznej opartej o procesy spalania w roku 2020. W poprzedniej odsłonie pracy rozdział ten był odrębnym. W obecnej postaci dobrze wpasowuje się on w strukturę pracy.

Na zakończenie rozdziału Doktorant przedstawia opracowane przez siebie oprogramowanie powstałe w języku programowania Python.

**Rozdział siódmy** to studium przypadku, w którym Doktorant porównuje instalację Marani ORC30 z instalacją opracowaną przez IMP PAN. Przedstawiono obliczenia za pomocą własnego modelu obliczeniowego dla sześciu czynników roboczych oraz wybranych parametrów zasilania układu celem wyznaczenia optymalnego rozwiązania kierując się mocą

netto układu ORC jako kryterium optymalizacyjnym. Wyniki przedstawiono na wykresach, bez obszerniejszej analizy, co prowadzi do pewnego niedosytu. Rozdział 7.3 to porównanie wyników obliczeń z obliczeniami przeprowadzonymi w IMP PAN. Między porównywanymi przypadkami występują spore rozbieżności, do których w niewielkim stopniu odnosi się Doktorant.

**Rozdział ósmy** to przedstawienie wniosków. Jest to nowo wprowadzony do pracy rozdział, który w większości wypełnia luki w dyskusji powstałe w poprzednich rozdziałach. Przeprowadzona jest analiza efektywności poszczególnych rozpatrywanych konfiguracji obiegów. Analizy te są kompetentne i potwierdzające dużą wiedzę Doktoranta z tego obszaru. W moim odczuciu niepotrzebnym było wprowadzanie nowego rozdziału, a przedstawiona dyskusja powinna być wpleciona do rozdziału siódmego.

**Rozdział dziewiąty** to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski. Wnioski mają charakter obserwacji z przeprowadzonych eksperymentów. Głównym wnioskiem z pracy jest zauważenie, że zastosowanie regeneracji w obiegu wyraźnie zwiększa maksymalną moc netto układu, a zastosowanie pętli pośredniczącej w dostarczaniu ciepła ma wpływ odwrotny na moc generowaną w układzie (za wyjątkiem oleju silikonowego MM). Wniosek ten wynika bezpośrednio z temperatur dostarczania ciepła do obiegu ORC, bezpośrednio wykorzystane spaliny mają temperaturę zdecydowanie wyższą niż olej termalny. Większość pozostałych wniosków związanych ze sprawnością cieplną poszczególnych konfiguracji jest oczywista i wynika z drugiej zasady termodynamiki. Oryginalne są wnioski związane z kosztami inwestycyjnymi i tę część pracy uważam za najbardziej interesującą. W rozdziale znajduje się także przedstawienie wdrożeniowego charakteru opracowanych narzędzi. Wynika z niego, że opracowane w pracy narzędzia obliczeniowe umożliwią firmie Marani szybkie i efektywne wykonywanie studiów wykonalności dla indywidualnych przypadków oraz wsparcie w procesie ofertowania.

## 2. Tezy badawcze pracy

W skorygowanej wersji pracy Doktorant zmienił tezę badawczą z:

*Efektywność energetyczna, ekonomiczna i ekologiczna odzysku ciepła odpadowego na potrzeby produkcji energii elektrycznej w modułowych układach siłowni, pracujących według obiegu Clausiusa-Rankine'a czynnika organicznego (ORC) jest zależna od doboru struktury technologicznej układu, czynnika roboczego, parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych i możliwe jest takie dostosowanie wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych, które w danych warunkach aplikacyjnych zapewni efekt optymalny.*

na następujące trzy elementy:

1. *Jest możliwe w warunkach polskiego rynku energii opracowanie konstrukcji modułowych siłowni ORC zasilanych przemysłowym ciepłem odpadowym, które spełniać będą kryteria opłacalności stawiane rzeczowym projektom inwestycyjnym.*
2. *W przypadku siłowni zasilanych ciepłem odpadowym kryterium optymalności dla zagadnienia doboru wartości poszczególnych zmiennych decyzyjnych w zakresie parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych można sprowadzić do kryterium maksymalizacji mocy obiegu termodynamicznego. W warunkach polskiego rynku energii zapewnia ono spełnienie kryterium optymalności z uwagi na końcowy efekt finansowy i opłacalność odzysku ciepła odpadowego.*
3. *Jest możliwe opracowanie (cytat z tekstu) narzędzia do obliczeń układu ORC, które pozwoli w krótkim czasie określić zakres stosowalności danego modułu siłowni ORC (rozumiany jako dopuszczalny obszar implementacji bez konieczności*

*wprowadzania zmian konstrukcyjnych) w kontekście dostępnych parametrów źródła ciepła odpadowego.*

Poprawione tezy pracy są zdecydowanie lepiej postawione i dostosowane do treści pracy. W ramach przeprowadzonych analiz za pomocą własnego modelu matematycznego oraz porównaniach z posiadanymi danymi eksploatacyjnymi z rzeczywistych prototypów ORC Doktorant wykazuje prawdziwość postawionych tez i dokumentuje je wynikami zamieszczonymi w pracy.

### **3. Oryginalność pracy**

W mojej ocenie trudno znaleźć oryginalne naukowe osiągnięcia pracy. Z oryginalnych osiągnięć pracy wskazałbym następujące elementy:

1. zebranie danych dotyczących ciepła odpadowego w Polsce w świetle jego możliwości dalszego wykorzystania, czyli w podziale na poziomy temperaturowe,
2. opracowanie korelacji szacujących koszty poszczególnych podzespołów i nośników ciepła w instalacji ORC, które rzeczywiście będą przydatne dla firmy,
3. opracowanie wyników obliczeń i badań, dyskusja wyników i zalecenia do przyszłych prac.

### **4. Wartości użytkowe pracy**

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się przede wszystkim wartościami użytkowymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistych prototypów instalacji ORC zbudowanych przez firmę Marani. Zaproponowane niewysublimowane narzędzia badawcze umożliwiają analizę takich obiektów, a przy małych modyfikacjach również i innych podobnych obiektów, oczywiście tylko dla płynów roboczych ujętych w dotychczasowej analizie. Rozszerzenia na inne płyny robocze będą wymagały uzupełnienia programu o koszty związane z dodatkowymi płynami. Szczególnie wartościowe dla firmy, w którą zaangażowany jest doktorant jest szacowanie kosztów układów ORC, które odbywają się równolegle z obliczeniami. Projektowanie tego typu elementów instalacji bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki.

### **5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy**

W poprawionej wersji pracy usunięto szereg niedociągnięć edytorskich i stylistycznych. Pod kątem merytorycznym przedstawiona do recenzji praca jest wartościowa pod względem użytkowym, niemniej nie wnosi dużej oryginalności do zagadnień modelowania obiegów termodynamicznych. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt prowadzenia przez Doktoranta wdrożenia instalacji ORC, które w warunkach krajowych jest oryginalne. Dotychczas prowadzone były podobne próby na instalacjach prototypów w laboratoriach uczelni i instytutów badawczych. Przedstawiony model matematyczny instalacji ORC jest klasycznym podejściem do wyznaczania poszczególnych elementów instalacji i nie znajduje tu elementów nowatorskich. Praca napisana jest zwięźle i zapoznaje czytelnika z informacjami koniecznymi do pełnego rozpoznania zagadnienia doboru instalacji ORC do danych parametrów cieplnych zasilania obiegu. W części dokonań własnych ma tak naprawdę charakter raportu z badań trzech instalacji ORC oraz jedno porównanie obliczeniowe z podobną instalacją zaprojektowaną w IMP PAN. W poprawionej wersji pracy określono wkład własny Doktoranta w realizację poszczególnych elementów pracy, co zdecydowanie przyczynia się do jej lepszej oceny w oczach recenzenta. Zaproponowane i zastosowane metody analizy obiegu termodynamicznego obiegu ORC są kompleksową metodyką przeprowadzania takich analiz ze względu na

dodatkowe uwzględnienie kosztów inwestycyjnych. Zgodnie z ustawą, przedmiotem rozprawy doktorskiej powinno być oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, lub oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej.

Z lektury pracy dodatkowo nasuwają się następne konkluzje, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem:

1. Pomimo, że z premedytacją Doktorant wspomina w części związanej z zakresem pracy, że pomija przedstawienie analizy egzergetycznej dla poszczególnych wariantów to uważam, że praca zyskała by na wartości merytorycznej w przypadku jej włączenia. Ośrodek śląski jest znany w skali świata z prowadzenia zaawansowanych analiz w tym zakresie. Przedstawiona analiza stanowi istotny wkład do problematyki eksploatacyjnej związanej z rozwojem układów ciepłno-przepływowych w instalacjach przemysłowych.
2. Analiza czynników roboczych do pracy w obiegach ORC jest zawsze bardzo interesująca. Nie ma doskonałego i uniwersalnego czynnika roboczego do takich celów. Na jakiej zasadzie Doktorant wybrał do analiz czynniki robocze do analizowanych instalacji ORC. Firma Turboden zastosowała czynnik MDM. Czy widzi Pan możliwość zastosowania innych czynników do tego celu? Analiza tego typu wzbogaciłaby wartość merytoryczną pracy.
3. Proszę skomentować możliwość zaproponowania dla rozpatrywanej/nych instalacji obiegu nadkrytycznego. Ciśnienie krytyczne czynników nie powinno być przeszkodą w implementacji, a korzyści ze względu na sprawność obiegu znaczne. Zagadnienie to należy rozpatrzeć z innym czynnikiem pośredniczącym w przypadku z grzaniem pośrednim obiegu za pomocą oleju termalnego. Posiadane narzędzie numerycznego mogłoby być bardzo pomocne w takiej analizie.

Pomimo korekt edytorskich przedstawiona mi do oceny jej wersja wciąż zawiera szereg błędów „literówkowych”, jak również i w terminologii oraz stylu prezentacji wyników. Niemniej jest ona zdecydowanie lepiej złożona i przedstawiona. Bibliografia w obecnej postaci pracy spełnia jednolity standard.

W pracy wciąż znajdują się nieliczne tzw. literówki, które pokrótce wymieniam poniżej:

1. W spisie oznaczeń należy zwrócić uwagę, że opisy symboli powinny zaczynać się z małej litery.
2. W spisie oznaczeń występuje błędnie napisane określenie liczby Nusselta.
3. Str. 10 linia 5 od dołu. Jest „ternie” powinno być „terenie”.
4. Str. 11 linia 15 od dołu. Jest „trackie” powinno być „trakcie”.
5. Str. 15 linia 12 od dołu. Jest „Barytona” powinno być „Braytona” (dwa razy).
6. Str. 17 linia 2 od góry. Jest „Claussiusa” powinno być „Clausiusa”.
7. Str. 19 linia 1 od góry. Jest „Ts” powinno być „T-s”.
8. Str. 26 linia 4 od góry. Jest „Oragnic” powinno być „Organic”.
9. Str. 29 linia 13 od góry. Jest „egzegetycznej” powinno być „egzergetycznej”.
10. Str. 34 linia 21 od góry. Jest „przyjmuj się” powinno być „przyjmuje się”.
11. Str. 57 linia 16 od dołu. Jest „ternie” powinno być „terenie”.

## 6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozważę stwierdzam, że w moim przekonaniu w obecnej postaci praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania obiegów ORC. Dotyczy ona wdrożenia trzech instalacji ORC oraz przeprowadzenia badań zarówno numerycznych jak i eksperymentalnych. Interpretacja

wyników jest przekonywująca, o wysokim poziomie kompetencji Doktoranta. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego, ale przede wszystkim praktyki inżynierskiej. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy, analizę posiadanych danych doświadczalnych i obliczenia za pomocą własnego narzędzia numerycznego. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksperymentalnych i numerycznych oraz głęboką wiedzą dotyczącą zagadnienia. Ponadto wykazał się dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego zagadnienia. Uzyskane wyniki budzą zaufanie.

**Podsumowując** stwierdzam, że w moim przekonaniu, praca spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez odpowiednie ustawy. Biorąc pod uwagę podstawowy charakter przedstawionych badań kwalifikowałbym ją do dyscypliny naukowej *inżynieria środowiska, górnictwo, energetyka*. Biorąc powyższe pod uwagę, **stawiam wniosek o dopuszczenie pracy mgr inż. Arkadiusza Musiała do publicznej obrony.**

Podpisał Dariusz Mikielewicz