

prof. dr hab. inż. Dariusz Mikielewicz
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

Gdańsk, 21 października 2021 r.

R E C E N Z J A

pracy doktorskiej mgr inż. Mateusza Świerzewskiego pt.

"Analiza i optymalizacja opalanych biomasą układów kogeneracyjnych w technologii organicznego obiegu Rankine'a"

wykonana na podstawie zlecenia z 12 października 2021 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 16 września 2021 r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jacek Kalina, prof. PŚl.

1. Przedmiot rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca pod tytułem „*Analiza i optymalizacja opalanych biomasą układów kogeneracyjnych w technologii organicznego obiegu Rankine'a*” dotyczy analiz układów kogeneracyjnych, wykorzystujących obieg Rankine’a z czynnikiem organicznym jako czynnikiem roboczym oraz różnymi elementami wspomagającymi układ. Doktorant przeprowadził gruntowną analizę dwóch pracujących instalacji z obiegami ORC i na tej podstawie przedstawił w sposób monograficzny zagadnienia związane z projektowaniem i eksploatacją tych elektrociepłowni.

Do przedstawionej w pracy analizy wykorzystano doświadczenia pozyskane przez Doktoranta na pracujących obiektach, jednym w Polsce w Krośnie oraz drugim, w Niemczech w Ostfildern, jak również obszerną wiedzę literaturową z modelowania procesów energetycznych zaimplementowanych w komercyjnych kodach obliczeniowych.

Praca nie ma charakteru klasycznego, tzn. wprowadzenia Czytelnika do tematyki pracy a następnie rozwinięcia tez składających się na cel pracy w przekonujący wywód merytoryczny. Oczywiście nie umniejsza to jakości pracy. Moim pierwszym odczuciem przy lekturze pracy było to, że jest ona doskonałym poradnikiem jak przygotować się do zaprojektowania a następnie eksploatacji elektrowni/elektrociepłowni ORC. Można powiedzieć, że pierwsze cztery rozdziały pracy są rzeczywiście rozdziałami przeglądowymi, w których Czytelnik jest wprowadzony do tematyki technologii ORC, zagadnień wykorzystania biomasy do spalania w kotłach technologii ORC oraz aspektów prawnych, nakierowanych przede wszystkim na ewentualną rentowność technologii. W kolejnych częściach Doktorant przybliży Czytelnikowi zasady modelowania układów energetycznych,

budowę modeli symulacyjnych układów oraz modelowanie empiryczne. Praca liczy łącznie 250 stron, z czego na część pierwszą (rozdziały 1-4), wprowadzającą do tematyki pracy, przypadają 82 strony. Praca zawiera 7 rozdziałów, spis literatury oraz spis rysunków, tabel i załączniki. Literatura wykazana jest w łącznej liczbie 174 pozycji, z czego 6 prac jest współautorstwa Doktoranta.

We **wstępnym rozdziale** do pracy czytelnik wprowadzony jest do tematyki struktury ciepłownictwa w Polsce, możliwych do wykorzystania koncepcji obiegów Rankine'a. Przedstawione są tezy badawcze pracy oraz cel i jej zakres.

W **rozdziale drugim** omawia elektrociepłownię biomasowe z modułem ORC. Przedstawia porównanie zalet i wad klasycznej technologii parowej oraz ORC. Dokładnie przedstawia obieg referencyjny, który jest wykorzystywany w większości analiz w pracy, tj. elektrociepłownię w Krośnie składającą się z zespołu kotłów rusztowych opalanych węglem kamiennym oraz instalacją ORC firmy Turboden z kotłem opalany biomasą o mocy elektrycznej 1317kW oraz cieplnej 5350 kW. Intencją pracy układu jest aby podstawowym źródłem był obieg ORC, w sytuacjach szczytowych wspomagany kotłami węglowymi. Omawia wymagania w stosunku do biomasy, jaka powinna być wykorzystywana w obiekcie. Przedstawia też instalację odzysku ciepła ze spalin.

W **rozdziale trzecim** Doktorant przedstawia doświadczenia eksploatacyjne elektrowni biomasowych z modułem ORC. Doświadczenia te zebrane są zarówno z pracy elektrociepłowni w Krośnie jak i Ostfildern, gdzie zainstalowano bliźniaczą instalację do krośnieńskiej. Identyfikuje zestawy danych potrzebnych do dalszej obróbki w ramach prowadzonych w doktoracie prac, zarówno mających charakter historyczny jak i obecnie eksploatowany, charakterystykę paliwa wykorzystywanego na przestrzeni czasu itp. Rozdział ten jest bardzo szczegółowo podchodzący do każdego elementu instalacji.

Rozdział czwarty przedstawia aspekty prawne związane z eksploatacją elektrociepłowni biomasowych w kraju w aspekcie ekonomicznym, tzn. aby ich eksploatacja była zyskowna. Omawiane są aspekty wsparcia inwestycyjnego oraz operacyjnego. Doktorant konkluduje, że bez systemów wsparcia inwestycja w elektrociepłownię ORC jest nieopłacalna.

Rozdział piąty przedstawia rozważania związane z implementacją w kodzie obliczeniowym Epsilon modelu elektrociepłowni dla przypadku krośnieńskiego. Przedstawiona jest metodyka przeprowadzania analiz cieplno-przepływowych w zakresie symulacji w trybie design oraz off-design. W moim odczuciu Doktorant wykonał ogromny zakres prac związany z możliwie dokładnym zamodelowaniem poszczególnych elementów instalacji, oraz wykonał stosowne obliczenia. W mojej opinii są to obliczenia sprawdzające dla istniejącej instalacji i nie dopatruję się specjalnego wkładu oryginalnego w ten obszar prac.

Rozdział szósty dotyczy problematyki wyboru kryterium i metod optymalizacji różnych konfiguracji zamodelowanej instalacji. Określona została funkcja celu w postaci maksymalizacji podstawowych wskaźników finansowych, tj. NPV i IRR.

Rozdział siódmy to podsumowanie wyników pracy oraz wnioski.

2. Tezy badawcze pracy

Doktorant w swojej pracy stawia cztery tezy badawcze, czyli:

- możliwa jest poprawa efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej układów technologicznych ciepłowni węglowych poprzez nadbudowę członem elektrociepłowniczym opalany biomasą w technologii ORC,
- przy określonej zmienności w czasie zapotrzebowania na ciepło opłacalność wdrażania technologii ORC w ciepłowniach komunalnych jest zależna od zmiennych

decyzyjnych w zakresie struktury technologicznej, wielkości bloku opalanego biomasa i sposobu jego eksploatacji,

- technologia ORC może być stanowić efektywne rozwiązanie w zakresie dekarbonizacji ciepłownictwa w przypadku ciepłowni małych i średnich mocy,
- w przypadku systemów ciepłowniczych małych i średnich mocy technologia ORC może być efektywnym rozwiązaniem umożliwiającym wykorzystanie lokalnych zasobów biomasy do realizacji gospodarki skojarzonej i konwersji ciepłowni w elektrociepłownię.

W ramach przeprowadzonych analiz za pomocą symulacji w kodzie Ebsilon oraz porównaniach z posiadanymi danymi eksploatacyjnymi z rzeczywistej elektrociepłowni Doktorant w pełni wykazuje prawdziwość postawionych tez i w pełni dokumentuje je wynikami zamieszczonymi w pracy.

3. Oryginalność pracy

W mojej ocenie oryginalne osiągnięcia pracy to:

1. opracowanie algorytmu do analizy obiegu termodynamicznego obiegu składającego się z kotłów węglowych, instalacji ORC, instalacji odzysku ciepła ze spalin oraz kotła biomasowego dostarczającego ciepło do instalacji ORC poprzez instalację pośrednią oleju termalnego,
2. opracowanie modelu matematycznego powyższego obiegu termodynamicznego w środowisku Ebsilon,
3. przeprowadzenie systematycznych obliczeń różnych wariantów konfiguracji obiegu termodynamicznego,
4. opracowanie wyników symulacji numerycznych, dyskusja wyników i zalecenia do przyszłych prac.

4. Wartości użytkowe pracy

Przedstawiona do oceny praca doktorska charakteryzuje się przede wszystkim bardzo dużymi wartościami użytecznymi, gdyż zagadnienia poruszane w pracy dotyczą rzeczywistej elektrociepłowni. Zaproponowane narzędzie badawcze umożliwia dogłębną analizę takiego obiektu, a przy małych modyfikacjach również i innych podobnych obiektów. Niemniej specyfika modelowania w kodzie Ebsilon nie umożliwia szerszego zastosowania tego narzędzia. Nie jest więc możliwe stworzenie narzędzia ogólnego. Do każdego nowego przypadku potrzebna jest praca zamodelowania całej instalacji. Pomaga w tym lektura całości pracy, która może być potraktowana jako podręcznik przy modelowaniu układów termodynamicznych za pomocą kodu Ebsilon. Projektowanie tego typu elementów instalacji bez wiedzy, która została przedstawiona przez Doktoranta wymaga dużego doświadczenia, które nabywa się latami analizując podobne przypadki. Dodatkowo brak takiego doświadczenia prowadzi do ułomności w modelowaniu oraz przewymiarowania lub niewłaściwej pracy modelowanych urządzeń, a co za tym idzie błędnego oszacowania ekonomicznego.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne do pracy

Przedstawiona do recenzji praca jest wartościowa, niemniej nie wnosi dużej oryginalności do zagadnień modelowania obiegów termodynamicznych. Napisana jest nieco rozwleknie, ale bardzo dobrze zapoznaje czytelnika z informacjami koniecznymi do pełnego rozpoznania zagadnienia. Ma tak naprawdę charakter podręcznika dla podobnych zagadnień. Jest

zilustrowana licznymi wykresami i rysunkami. Zaproponowane i zastosowane metody analizy obiegu termodynamicznego elektrociepłowni są kompleksową metodyką przeprowadzania takich analiz za pomocą komercyjnego oprogramowania. Przedstawiona analiza stanowi istotny wkład do problematyki projektowej i eksploatacyjnej związanej z rozwojem układów ciepłno-przepływowych w instalacjach przemysłowych. Ogólna ocena pracy przez recenzenta jest więc pozytywna. Praca porusza ważny problem i przedstawia wartościowe rezultaty. Potwierdzone jest to także przez szereg opublikowanych prac, w których Doktorant jest współautorem.

Praktycznie trudno znaleźć mankamenty merytoryczne pracy. Praca napisana jest poprawnym językiem, z wykorzystaniem właściwej terminologii, a jej lektura nie nastręcza większych trudności. Na uwagę zasługuje praktycznie idealna strona edytorska pracy, nieliczne są uchybienia językowe, a szata graficzna jest nienaganna.

Kwestie, które chciałbym wyjaśnić z Doktorantem dotyczą przede wszystkim możliwości uogólnienia opracowanego modelu dla innych przypadków:

1. Kod Epsilon umożliwia wprowadzanie własnych procedur obliczeniowych opracowanych przez użytkownika. Czy taka sytuacja miała miejsce w niniejszej pracy. Zastosowanie takich funkcji w sposób wydatny podwyższa jakość modelu, w odróżnieniu od standardowych równań bilansowych do analizy poszczególnych elementów składowych instalacji.
2. Analiza czynników roboczych do pracy w obiegach ORC jest zawsze bardzo interesująca. Nie ma doskonałego czynnika do takich celów. Co Doktorant sądzi o czynniku roboczym w analizowanej instalacji ORC. Turboden zastosował MDM. Czy widzi Pan możliwość zastosowania innych czynników do tego celu? Analiza tego typu wzbogaciłaby wartość merytoryczną pracy.
3. Proszę skomentować możliwość proponowania dla rozpatrywanej instalacji obiegu nadkrytycznego. Ciśnienie krytyczne MDM nie powinno być przeszkodą w implementacji. Oczywiście zagadnienie to należy rozpatrzeć z innym czynnikiem pośredniczącym. Posiadane narzędzie numerycznego mogłoby być bardzo pomocne w takiej analizie.
4. Rys. 3.9 – dlaczego dla obiegu termodynamicznego zimą występuje przegrzanie czynnika, a nie ma go latem?
5. Rys. 3.10 – Proszę wyjaśnić rozbieżności w temperaturze w porównaniu do odpowiadającego ciśnienia nasycenia czynnika.
6. Rys. 5.11 pokazuje znormalizowaną charakterystykę sprawności izentropowej turbiny w funkcji przepływu masowego. Czy jest możliwość uzupełnienia punktów dla zredukowanego przepływu masowego 0.6-0.8? Mogłoby to mieć wpływ na charakter przebiegu krzywej charakterystyki.

W pracy znajdują się nieliczne błędy edytorskie, których nie wymieniam. Są to przede wszystkim błędy końcówek wyrazów, gdzie zamiast litery „e”: jest „ę”

6. Wniosek końcowy

Biorąc powyższe uwagi pod rozwagę stwierdzam, że w moim przekonaniu praca może stanowić rozprawę doktorską. Traktuję ją jako rzeczywisty wkład do teorii modelowania obiegów termodynamicznych. Dotyczy ona systematycznych badań zarówno numerycznych jak i eksploatacyjnych. Interpretacja wyników jest przekonująca, o wysokim poziomie kompetencji Doktoranta. Uzyskane wyniki obserwacji oraz przeprowadzona analiza wyników jest interesująca, ważna zarówno z punktu widzenia poznawczego jak też i praktyki



inżynierskiej. Autor przeprowadził rzetelny przegląd literaturowy, analizę posiadanych danych eksploatacyjnych i obliczenia za pomocą modelu obiegu termodynamicznego w kodzie komercyjnym Epsilon. Wykazał się umiejętnością analizy wyników badań eksploatacyjnych 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. Mateusza Świerzyńskiego do publicznej obrony.**



