

Warszawa, 30 grudnia 2021 r.

dr hab. inż. Wojciech Bujalski, prof. uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Ciepłej
ul. Nowowiejska 24
00-665 Warszawa
email: wojciech.bujalski@pw.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Świerzeńskiego pod tytułem „Analiza i optymalizacja opalanych biomasą układów kogeneracyjnych w technologii organicznego obiegu Rankine’a”

WPROWADZENIE

Rozprawa mgr. inż. Mateusza Świerzeńskiego dotyczy tematu optymalizacji doboru struktury, wielkości mocy zainstalowanej, doboru czynnika roboczego oraz parametrów pracy układu ORC. Zagadnienie optymalizacji struktury i parametrów układów energetycznych jest szczególnie ważne w czasach, kiedy energia staje się coraz droższa i trudniejsza do pozyskania. Wiele opublikowanych i publicznie dostępnych prac porusza to zagadnienie, ale obszar badawczy jest tak szeroki, że wiele zagadnień jest ciągle niezbadanych, a ich rozwiązanie jest istotne dla optymalnej pracy obiektów energetycznych. Dysertacja mgr. inż. Matusza Świerzeńskiego wpisuje się doskonale w obszar uzupełnienia wiedzy dotyczącej optymalizacji siłowni ORC zasilanych ze źródeł opalanych biomasą. Istotną zaletą tej pracy jest to, że jest ona oparta na rzeczywistych danych i doświadczeniach z wielu lat eksploatacji tego typu obiektu. W badania wykorzystano analizy pracy dwóch rzeczywistych obiektów, która stanowiła podstawę budowy odpowiednich modeli matematycznych. Układy ORC powinny w najbliższych latach podlegać intensywnemu rozwojowi, ponieważ są to układy dedykowane głównie do wykorzystania energii odnawialnej (głównie biomasa) z technologią kogeneracyjną możliwą do aplikowania w małej skali. W Polsce istnieje olbrzymi potencjał rozwoju tej technologii, ponieważ, mimo, że około 75% ciepła produkowane jest w kogeneracji, to większość siłowni zasilających systemy ciepłownicze stanowią ciepłownie. W szczególności obecnie jest dobry okres na rozwój tej technologii, ponieważ od roku 2025 zaczną obowiązywać nowe standardy emisyjne wprowadzone przez Dyrektywę MCP. Spowoduje to konieczność moderacji większości polskich ciepłowni. Ciepło z systemów ciepłowniczych będzie mogło konkurować ze źródłami kogeneracyjnymi jeżeli będzie wytwarzane w technologii kogeneracyjnej i/lub opartymi na odnawialnych źródłach energii. Jak widać temat pracy jest bardzo ważny i aktualny.

ZAWARTOŚĆ PRACY

Rozprawa zawiera łącznie 7 rozdziałów, w tym wstęp i podsumowanie. Poza tym Autor opracował i zamieścił wykaz ważniejszych oznaczeń, spis literatury, wykaz rysunków i tabel. Do pracy dołączonych zostało 9 załączników. W załącznikach zawarte są między innymi szczegółowe dane dotyczące wyników obliczeń.

W rozdziale pierwszym, na początku przedstawiono motywację do podjęcia rozważanego tematu pracy. W dalszej części rozdziału został scharakteryzowany rynek ciepłowniczy jako miejsce do potencjalnego zastosowania technologii ORC. W ramach przeglądu rynku ciepłowniczego przedstawiono podstawowe dane dotyczące rynku ciepła oraz przedstawiono ogólną charakterystykę tego rynku. W dalszej części zostały opisane układy ORC. W tej części pracy przedstawiono badania literaturowe dotyczące istniejących rozwiązań tego typu. Przedstawione informacje stanowią bardzo dobrą podstawę do tego, aby zdefiniować cel i zakres pracy. Doktorant w sposób jasny i zrozumiały zdefiniował cel pracy oraz opisał zakres prowadzonych badań. Ze względu na skomplikowany przebieg pracy badawczej został on zilustrowany na schemacie, co znacznie ułatwia zrozumienie przebiegu procesu badawczego. Jako główny cel pracy została zdefiniowana analiza i optymalizacja doboru wielkości i struktury elektrociepłowni ORC opalanej biomasą w projekcie modernizacji małej lub średniej kotłowni węglowej w warunkach polskich. W rozdziale tym zostały również zdefiniowane tezy badawcze.

Drugi rozdział zawiera analizę pracy elektrociepłowni biomasowych z modułem ORC. W rozdziale przedstawione są ogólne rozważania dotyczące technologii ORC, w tym porównanie technologii ORC z klasycznymi blokami parowymi. W dalszej części została przedstawiona szczegółowa analiza pracy elektrociepłowni w Krośnie, w której zainstalowany jest układ ORC. Autor większość swoich dalszych analiz oparł na historycznych danych ruchowych z tego obiektu. Poza tym przedstawiono wiele szczegółowych analiz, które pozwalają lepiej zrozumieć sposób pracy tego układu oraz szczegółów uwarunkowań pracy siłowni opartych o obiegi ORC. Analizie poddano wszystkie elementy elektrociepłowni w tym układ kondensacji pary ze spalin współpracujący z układem ORC, jak również pracę kotłów wodnych stanowiących źródło szczytowe.

Rozdział trzeci zatytułowany „Doświadczenie eksploatacyjne elektrociepłowni biomasowych z modułem ORC” jest nieco mylący. Zawartość tego rozdziału dotyczy porównania pracy układów i osiągnięć rozważanej elektrociepłowni w Krośnie z elektrociepłownią w Ostfildern (Niemcy) eksploatującą układ o zbliżonych parametrach. Jest to obszerny rozdział opisujący różnice w strukturze i osiągnięciach obu układów. Przedstawiono w tym rozdziale szereg bardzo ciekawych analiz i porównań obu układów. Nie jest jednak zrozumiała celowość tych analiz, ponieważ trudno doszukać się wykorzystania wyników tego rozdziału w dalszych badaniach, np. w postaci weryfikacji modelu dla obu elektrociepłowni.

Rozdział czwarty opisuje aspekty prawne w zakresie budowy układów biomasowych. W tym krótkim rozdziale zostały przytoczone najważniejsze regulacje prawa krajowego i unijnego prawa wpływające bezpośrednio na realizację inwestycji biomasowych.

Rozdziały piąty i szósty stanowią podstawę rozprawy i dotyczą problematyki modelowania, przy czym rozdział piąty poświęcony jest budowie modelu i symulacji układu, a rozdział szósty poświęcony jest zagadnieniu optymalizacji układu.

Na wstępie w rozdziale piątym przedstawiono przegląd literatury dotyczący zagadnień modelowania układów ORC. Następnie omówiono sposób budowy modelu matematycznego z użyciem programu

Epsilon Professional. Cennym elementem tej pracy jest analiza wrażliwości modelu na parametry wejściowe, która pozwala ocenić jakość zbudowanego modelu. W celu pełniejszej oceny zaproponowanych rozwiązań zaproponowano również model egzergetyczny układu wraz z analizą strat. Analiza taka pozwala na ocenę doskonałości termodynamicznej rozważnego układu. W następnej części szczegółowo opisano budowę modelu off-design. Cennym elementem tej analizy jest to, że oparta ona jest na danych rzeczywistych z Elektrociepłowni w Krośnie. Dzięki temu model jest bardziej wiarygodny niż model oparty na danych literaturowych. W rozdziale tym zostały zaproponowane również trzy typy (trzy różne struktury) układów do celów optymalizacyjnych, dla których zostały opracowane odpowiednie modele dla ośmiu różnych czynników roboczych. Opracowanie modeli matematycznych pozwalających na modelowania tak szerokiego zakresu i technologii, i czynników uważam za istotne osiągnięcie Doktoranta.

Rozdział szósty to optymalizacja struktury układu. Optymalizacja struktury jest jednym z najtrudniejszych zagadnień optymalizacyjnych, ponieważ zawiera w sobie nieciągłość zmiennych. W tym rozdziale Autor zaproponował schemat postępowania przy optymalizacji układu oraz przedstawił sposób optymalizacji. Z wykorzystaniem opracowanego modelu wykonał szereg obliczeń i przedstawił wyniki dla optymalizacji wielkości układu, struktury zewnętrznej i wewnętrznej układu referencyjnego.

W rozdziale siódmym przedstawiono wnioski z pracy.

OCENA ROZPRAWY

Rozprawa porusza bardzo trudny temat jakim jest optymalizacja struktury zarówno wewnętrznej jak i zewnętrznej układu przy założeniu osiągnięcia optymalnych parametrów pracy układu dla obiektu rzeczywistego. Zadanie takie wymaga rozwiązania bardzo dużej liczby zagadnień, z którymi Autor poradził sobie bardzo dobrze. Różnorodność zadań i przenikanie się wzajemne tematów powoduje trudność opisu, a w konsekwencji także odbioru. Podczas czytania pracy odczuwalny jest miejscami niedosyt informacji, np. o przyjętych założeniach, o sposobie pracy układu przy obliczeniach optymalizacyjnych. Opis zakresu stosowania modelu fizycznego i empirycznego jest zaprezentowany mało czytelnie. Nie do końca jest jasny sposób wykorzystania przedstawianej analizy porównawczej pracy układów ORC w Krośnie i Ostfildern. Autor poświęcił temu znaczną część pracy, a w mojej ocenie brak jest wykorzystania tej analizy w dalszych częściach pracy, np. w postaci sprawdzenia poprawności działania zaproponowanego modelu dla Elektrociepłowni w Ostfildern, o ile możliwe do pozyskania dane na to pozwalają. Należy jednak podkreślić, że sama jakość opisów wybranych zagadnień jest zrobiona dobrze i pozwala w sposób łatwy i przejrzysty zrozumieć opisywane zagadnienia. Autor w wielu miejscach zamieścił schematy postępowania, co znacznie ułatwia zrozumienie pracy. W pracy widać dużą staranność przygotowania opisów.

Jako główne osiągnięcie Doktoranta uważam opracowanie modelu optymalizacyjnego i wykonanie obliczeń. Należy podkreślić bardzo szerokie potraktowanie tematu, począwszy od analizy rzeczywistych parametrów układu, poprzez zbudowanie modelu symulacyjnego układu zwalidowanego na danych rzeczywistych poprzez wykonanie bardzo skomplikowanych obliczeń optymalizacyjnych, gdzie kryterium są wskaźniki ekonomiczne opisujące efektywność ekonomiczną inwestycji w całym ekonomicznym okresie życia. Optymalizacja z wykorzystaniem w funkcji celu ekonomicznych wskaźników, takich jak NPV czy IRR, wymagała między innymi zbudowania zależności kosztów inwestycyjnych w funkcji wielkości układu. Bardzo skomplikowany proces obliczeniowy zadania optymalizującego strukturę układu wymusił konieczność ustrukturyzowania prac badawczych i podzielenia całości zadania na podzadania. Każde z podzadań zostało rozwiązane z dużą starannością

i w sposób prawidłowy. Należy podkreślić również, że całość prac badawczych została poparte dobrze przygotowanymi studiami literaturowymi.

UWAGI KRYTYCZNE I Dyskusyjne

Poniżej przedstawione są uwagi szczegółowe i dyskusyjne do treści rozprawy.

- Teza badawcza „przy określonej zmienności w czasie zapotrzebowania na ciepło opłacalność wdrażania technologii ORC w ciepłowniach komunalnych jest zależna od zmiennych decyzyjnych” jest oczywista i chyba nie wymaga udawadniania
- Pewne wątpliwości budzi stwierdzenie, że układu kontroli układów ORC są prostsze niż układów parowych. Ilość elementów wykonawczych w obu obiegach nie różni się istotnie, więc nie widzę przyczyn, dla których układy sterowania układów ORC mogłyby być prostsze.
- Niezrozumiałe jest stwierdzenie, że bloki ORC posiadają stosunkowo prosty projekt opracowany na podstawie sparametryzowanych i standardowych komponentach w porównania do klasycznych bloków parowych (str. 23)
- Na rysunku 2.6 są umieszczone numery urządzeń, które nie zostały wykorzystane w opisach – wykorzystanie ich mogłoby pomóc w czytelności opisu tego fragmentu pracy
- Rysunki 2.6 i 3.1 są prawie identyczne – czy jest sens powtarzania rysunków, przy czym legenda rysunku 3.1 praktycznie jest niewidoczna
- Nie jest jasne na jakiej podstawie zostały przyjęte wartości przedstawione w tabeli 5.1
- **W modelu zaproponowano, aby opracowane charakterystyki pinch dla wymienników dla modelu off-design były stosowane dla innych czynników roboczych. Czy zbadano taką możliwość, ponieważ inne czynniki będą miały inne charakterystyki typu lepkość, gęstość, inne parametry przejścia z przepływu laminarnego do turbulentnego, więc inne zupełnie warunki wymiany ciepła?**
- Nazwa rozdziału 5.2 „*Model symulacyjny*” jest trochę myląca. Wydaje się, że poprzednie rozdziały były poświęcone budowie modelu, a w tym rozdziale przedstawiono wykorzystanie modelu do wykonania symulacji
- **Na rysunku 5.14 zaproponowano 3 struktury układów ORC jakie poddano badaniu. Brak jest informacji na jakiej podstawie opracowano te struktury**
- **Czy właściwe jest rozważanie sprawności wewnętrznej turbiny w funkcji mocy elektrycznej (rysunek 5.20). Wydaje się, że lepszym parametrem byłby przepływ pary, dzięki czemu możliwe byłoby uzyskanie lepszej korelacji**
- W rozdziale 5.2.2. brak precyzyjnego opisu założeń do sposobu pracy instalacji. Należy się domyślać, że rozważany układ ORC pracuje w podstawie a kotły wodne uzupełniają brakującą moc. Rozważany układ miałby zastąpić istniejący układ ORC
- W rozdziale 6.1.2. brak jasno sprecyzowanego wariantu odniesienia. Można się domyślać, że wariant odniesienia stanowi ciepłownia tylko z kotłami węglowymi
- Rysunek 6.9 jest bardzo cenny, ponieważ pomaga zrozumieć skomplikowany proces obliczeniowy, ale kilka z rozgałęzień jest nieopisanych co utrudnia zrozumienie całości
- Rysunek 6.14 – nie jest jasne jak jest definiowana dyspozycyjność. Wydaje się, że dyspozycyjność zależy od tego, czy urządzenie jest w dyspozycji, czy nie i nie wpływa na to sposób obciążenia lub obciążenie wpływa w bardzo małym stopniu

- **Rozdział 6.3 nie jest jasne czy do opracowania planu pracy brana jest pod uwagę prognoza zapotrzebowania na ciepło i na jakiej podstawie wykonywane są korekty pracy planu zasobnika**
- Wskazano, że optimum wyliczone dla kryterium NPV jest inne niż dla kryterium IRR. Wskazane jest skomentowanie takiej różnicy
- Inne drobne błędy redakcyjne, takie jak literówki.

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości pracy, a są jedynie elementami pozwalającymi na polepszenie jakości publikacji opracowanych na podstawie przedstawionej rozprawy.

PODSUMOWANIE

Pracę oceniam bardzo dobrze. Podjęta tematyka wymagała rozwiązania szeregu zadań cząstkowych, z których żadne nie było łatwe do rozwiązania. Głównym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie spójnego modelu matematycznego układu ORC oraz przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych. Doktorant do celów symulacji musiał zaproponować również szereg modeli pomocniczych, takich jak model zasobnika. Uwzględnienie jednocześnie wszystkich zakładanych zmiennych decyzyjnych w jednym zadaniu optymalizacyjnym jest niezmiernie trudne. Autor zaproponował ustrukturyzowanie tych obliczeń dzięki czemu możliwe było sprawne wykonanie optymalizacji i otrzymanie wielu interesujących wyników pozwalających na lepsze podejmowanie decyzji inwestycyjnych. W pracy zostało przedstawionych wiele bardzo cennych analiz doboru układów ORC, w tym struktury i czynnika roboczego. Uważam to za duże osiągnięcie Doktoranta. Całość obliczeń została zwalidowana na danych rzeczywistych, co podnosi wartość, a otrzymane wyniki mogą być wykorzystane (po przeliczeniu na obecne warunki ekonomiczne) do podjęcia decyzji inwestycyjnych.

Podsumowując uważam, że przedstawiono rozprawa spełnia wszystkie ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Mateusza Świerzewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Doceniając jakość przedstawionej pracy, a w szczególności rozwiązanie bardzo skomplikowanego zagadnienie optymalizacyjnego, wnioskuję o wyróżnienie pracy.

