Prof. dr hab. inż. Witold ELSNER
Instytut Maszyn Cieplnych
Politechnika Częstochowska
ul. Armii Krajowej 21; 42-200 Częstochowa
tel.: (034) 3250507; **e-mail:** welsner@imc.pcz.czest.pl

Częstochowa, 04.02.2021

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Jóźwiaka:

„Analiza wpływu parametrów wody chłodzącej skraplacza na efektywność energetyczną upustowo – kondensacyjnej turbiny parowej"

Recenzja została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka Prof. PP w piśmie DIM.63.277.2020 z dnia 01.12.2020r.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Leon Bogusławski Prof. PP natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Robert Kłosowiak.

Przedstawiona do recenzji praca zawiera 123 strony i jest podzielona na osiem rozdziałów.

1. Ocena ogólna.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień eksploatacyjnych związanych z funkcjonowaniem bloku energetycznego pracującego w układzie ciepłowniczo-kondensacyjnym, a zwłaszcza wpływu parametrów układu chłodzenia na efektywność energetyczną siłowni. Obiektem zainteresowania Doktoranta jest podstawowy wymiennik ciepła w obiegu wodno-parowym bloku jakim jest kondensator, który odpowiedzialny jest za skroplenie rozprężonej pary i uzyskanie niskiego ciśnienia w dolnym punkcie pracy. Wysoka wartość ciepła parowania wody przy niskim ciśnieniu powoduje, że do otoczenia oddawana jest duża ilość ciepła, co wpływa na niską sprawności termiczną takiego układu. Do odbioru ciepła ze skraplacza wykorzystywany jest otwarty, lub zamknięty układ wody chłodzącej.

Poprawa sprawności bloku energetycznego możliwa jest poprzez szereg różnych działań konstrukcyjnych, lub operacyjnych, z których jako jedno z relatywnie łatwiej dostępnych, chociaż niezbyt często stosowanych, jest obniżenie temperatury skraplania pary w skraplaczu. Jednym z istotnych ograniczeń jest tu jednak temperatura dostępnego czynnika chłodzącego. Doktorant zwrócił uwagę, że oprócz efektywności wymiany ciepła w skraplaczu, na co wpływa też poziom jego zanieczyszczenia, ma również strumień masowy wody chłodzącej. Bazując na przeglądzie literatury oraz na doświadczeniach wdrożeniowych zastosowanych w parowych blokach kondensacyjnych dużej mocy postawił tezę, że *„Istnieje możliwość poprawy wskaźników techniczno-ekonomicznych turbozespołu ciepłowniczo-kondensacyjnego poprzez regulację przepływu wody chłodzącej przez skraplacz turbiny parowej"*. Podjęcie badań w tym zakresie autor motywuje faktem, że w ostatnim okresie czasu zwiększono nacisk

na maksymalizację efektywności wytwarzania energii bloku parowego, co spowodował, że również poszukiwanie optymalnych parametrów pracy skraplacza stało się pożądane.

Dla uzasadnienia tej tezy przeprowadził badania obiektowe oraz obliczenia bilansowe dla turbozespołu nr 1 o mocy elektrycznej 120 MW zainstalowanego w PGE Energia Ciepła w Krakowie a następnie uzupełnił je o rozszerzona analizę wpływu zmiany parametrów chłodzenia skraplacza parowego na efektywność bloku parowego. W celu przeprowadzenia tej analizy Doktorant przygotował zero wymiarowy model numeryczny pozwalający na wyznaczanie ciśnienia w skraplaczu dla stanów ustalonych przy zmiennych parametrach pracy turbiny i chłodzenia kondensatora oraz model numeryczny pozwalający na wyznaczenie charakterystyk efektywności energetycznej turbozespołu.

W mojej ocenie podjęta tematyka jest istotna, gdyż nie tylko krajowa energetyka, ale również ciepłownictwo oparte w dużym stopniu na węglu, ze względu na rosnące wymagania środowiskowe (konkluzje BAT, dyrektywa MCP, OZE, ETS) oraz efektywnościowe (ustawa o efektywności energetycznej), wymaga działań pozwalających na zwiększenia sprawności wytwarzania.

Uważam, że tematyka badań należąca do nurtu prac badawczych z obszaru eksploatacji maszyn energetycznych została prawidłowo nakreślona i może stanowić przedmiot pracy doktorskiej. Należy również stwierdzić, że tytuł rozprawy jest dobrze dobrany i właściwie oddaje jej treść a temat rozprawy. Przewód doktorski został wszczęty w dyscyplinie *budowa i eksploatacja maszyn*. Według obecnej klasyfikacji rozprawa jest na pograniczu dyscyplin *inżynieria mechaniczna* oraz *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka* i od decyzji Rady Dyscypliny zależy w jakiej dziedzinie zostanie nadany stopień naukowy doktora.

2. Ocena szczegółowa.

Praca, po krótkim wstępie, rozpoczyna się od sformułowania tezy pracy, przedstawienia celów szczegółowych oraz krótkiej argumentacji dotyczącej przyczyn podjęcia tematu. W tym zakresie (podrozdział 1.3) spodziewałbym się lepszego uzasadnienia merytorycznego i podkreślenia konieczności podejmowania działań mających na celu podniesienie efektywności energetycznej bloku kondensacyjno-upustowego, zarówno w stanie ustalony, jak i dla zmiennych parametrów pracy turbiny, co przecież było zasadniczym zadaniem realizowanym w merytorycznej części pracy. Uczucie niedosytu pozostawia również lektura podrozdziału 1.1, gdzie oprócz przeglądu rozwiązań technologicznych, można by więcej miejsca poświęcić metodom modelowania i optymalizacji, z wykorzystaniem różnych modeli od zero-wymiarowych po modele wyższego rzędu. Literatura w tym zakresie jest bogata a ilość kodów, nie tylko komercyjnych obszerna. Pozwoliłoby to Autorowi lepiej uzasadnić nie tylko wybór zagadnienia badawczego, ale również wybór zastosowanej przez siebie metodyki modelowania wybranego węzła obiegu cieplnego.

Rozdział 2 poświęcony jest opisowi procesów zachodzących w skraplaczu, w którym Autor przedstawia, w większości, podręcznikowe zależności i modele cząstkowe wymiany ciepła w skraplaczu, w tym po stronie pary jak i wody chłodzącej. Niemniej jest to solidny i potrzebny przegląd, który pozwala następnie przygotować Autorowi całościowy model obliczeniowy opisujący wymianę ciepła w skraplaczu, który został zawarty w rozdziale 3. Sama treść rozdziału 2 potwierdza znajomość i orientację Doktoranta w tematyce pracy.

Niemniej analizując zawarty tu materiał opisowy nasuwają się następujące pytania szczegółowe:

- w równaniu 2.8 brakuje uwzględnienia strat ciepła do otoczenia, czy jest to celowy zabieg? Jakiego rzędu są to straty?
- czy współczynnik przewodzenia w równaniu 2.11 jest stały, czy zależny od temperatury?
- jaką wartość wykładnika m (rów. 2.16) ostatecznie przyjęto w obliczeniach?
- Autor podaje trzy zależności kryterialne na liczbę Nusselta po stronie wody chłodzącej. Którą ostatecznie przyjęto w obliczeniach?

Rozdział 3 zawiera opis wspomnianego powyżej modelu obliczeniowego, który iteracyjnie pozwala wyznaczyć ciśnienie w skraplaczu dla zadanych parametrów pracy turbozespołu oraz modelu obliczeniowego służącego do wyznaczania charakterystyk efektywności energetycznej turbozespołu. Ten ostatni model zakłada uwzględnienie zmiennego masowego przepływu wody chłodzącej, wykorzystując jako dane wejściowe wyniki obliczeń pierwszego modelu. Czy przyjmując za punkt odniesienia założono przepływ wody dla nominalnych , projektowych warunków pracy turbozespołu?

W kolejnym rozdziale (rozdział 4) Autor opisuje badania eksperymentalne przeprowadzone na obiekcie rzeczywistym, którym był turbozespół ciepłowniczo-kondensacyjny o mocy elektrycznej 120 MW zainstalowanym w Elektrociepłowni Kraków. Szczegółowo opisana została konstrukcja i parametry turbozespołu oraz skraplacza z układem chłodzenia, aparaturę pomiarową oraz program badań. Pomiary wybranych wielkości były realizowane z wykorzystaniem aparatury zewnętrznej dla dwóch trybów pracy, kondensacyjnego i ciepłowniczo-kondensacyjnego. Należy tu zwróci uwagę, i docenić, że Autor miał możliwość uczestnictwa w badaniach prowadzonych na rzeczywistym obiekcie, co nie jest częstym przypadkiem, ze względu na wysokie koszty takich badań obiektowych. Dobrze byłoby jednak, żeby Autor wskazał w pracy jaki był jego osobisty udział w pomiarach, czy realizował je samodzielnie, czy też uczestnicząc w badaniach większego zespołu.

Efektem tych pomiarów jest zestaw charakterystyk stopnia suchości pary w funkcji temperatury nasycenia i strumienia pary do kondensatora oraz charakterystyki poboru mocy silnika pompy chłodzącej. Szkoda jednak, że Autor nie pokusił się o szersze wykorzystanie zgromadzonych a zestawionych w tabelach danych, przykładowo do analizy parametrów kondensatora np. zmienności temperatury spiętrzenia, strumienia wody chłodzącej, strumienia odebranego ciepła w kondensatorze.

Największą wartość merytoryczną mają badania opisane w rozdziale 5, w który na początku dokonano weryfikacji metody numerycznej wyznaczając wartości ciśnienia w skraplaczu dla różnych parametrów a następnie porównano je z wynikami pomiarów. Na koniec stwierdzono, że cytuję *„osiągnięte rezultaty wyznaczania ciśnienia w skraplaczu metodą obliczeniową potwierdzają poprawność przyjętej metodologii przy opracowywaniu modelu numerycznego*". Taki komentarz uważam za niewystarczający biorąc pod uwagę wyniki zaprezentowane na rys. 5.3 i 5.4, gdzie różnice pomiędzy wartościami pomiarowymi a obliczeniowymi są odmienne w zależności od numeru pomiaru.

Następnie obliczono wartości ciśnienia w kondensatorze, w szerokim zakresie masowego strumienia wody chłodzącej, dla czterech różnych temperatur wody chłodzącej przy różnym strumieniu pary do skraplacza. Stanowiło to podstawę do wyznaczenia efektu

energetycznego turbozespołu dla układu z jedną, dwoma i trzema pompami wody chłodzącej. Wykazano, że dostosowanie układu chłodzenia do parametrów pracy turbiny jest celowe a maksymalny efekt energetyczny uzyskano na poziomie bliskim 1.9 % w stosunku do warunków nominalnych co jest w moim uznaniu liczącą się wartością. Brakuje mi jednak w tym rozdziale szerszego komentarza do materiału graficznego zaprezentowanego na rys. 5.5-5.14.

Uzupełnieniem powyższych analiz jest analiza środowiskowa i energetyczna (rozdział 6), w której oszacowano zmniejszenie zużycia paliwa oraz redukcję dwutlenku węgla do atmosfery. Zakładając zmniejszenie zmniejszenia zapotrzebowania energii elektrycznej przez pompy wody chłodzącej uzyskano względny wzrost produkcji energii elektrycznej netto na poziomie 0,28 %, spadek zużycia paliwa o 770,7 Mg oraz redukcję emisji dwutlenku węgla na poziomie 1 514,7 Mg w skali roku.

Praca została podsumowana w rozdziale 7, przy czym uważam, że lepiej byłoby aby w tym rozdziale Autor skoncentrował się tylko na obserwacjach i najważniejszych wnioskach merytorycznych zamiast odnosić się do rozliczenia zadań szczegółowych zdefiniowanych na wstępie pracy. Niemniej uważam, że uzyskane wyniki są wartościowe i mogą być przesłanką do praktycznego wdrożenia zaproponowanej procedury, nie tylko dla wybranego typu turbozespołu, ale również dla innych boków energetycznych i ciepłowniczych.

3. Uwagi końcowe

Zaprezentowane w trzech końcowych rozdziałach wnioski pozwalają stwierdzić, że założone cele pracy zostały zrealizowane. Praca dotyczy aktualnej tematyki badawczej i jest istotna zwłaszcza z praktycznego punktu widzenia. Wyniki zaprezentowane w pracy są wartościowym uzupełnieniem zwłaszcza praktycznej wiedzy z zakresu eksploatacji turbozespołów energetycznych i ciepłowniczych. Zawartość pracy oraz jej poziom merytoryczny świadczy, że Autor dysponuje wiedzą oraz odpowiednim doświadczeniem w rozwiązywaniu problemów naukowych. Mam pewne zastrzeżenia do języka pracy, niektórych zwrotów i sformułowań, ale są one mniej istotne w stosunku do wartości merytorycznej pracy. Należy podkreślić, że sformułowane w recenzji uwagi krytyczne nie umniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

Reasumując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa stanowi samodzielne i oryginalne rozwiązanie złożonego zadania naukowego, a uzyskane przez Doktoranta wyniki badań mają odpowiednią wartość poznawczą.
Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Jóźwiaka spełnia wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.