

Warszawa, dn. 24.11.2022

Dr hab. inż. Rafał Laskowski, profesor uczelni
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
Instytut Techniki Ciepłej
ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa
e-mail: rafal.laskowski@pw.edu.pl

Recenzja Rozprawy Doktorskiej
Mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek
„Optymalizacja pracy skraplaczy turbinowych w pełnym
paśmie regulacji obciążenia”

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina w piśmie o numerze RIE-BD.512.43.2022 z dnia 11.10.2022.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Henryka Łukowicza.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, zawiera 160 stron i jest podzielona na siedem rozdziałów. W pracy znajduje się streszczenie po polsku i angielsku, wykaz oznaczeń, bibliografia i załączniki.

Celem rozprawy doktorskiej jest analiza możliwości optymalizacji pracy skraplaczy turbinowych. Optymalizacja ta dotyczy sposobów połączenia głównych skraplaczy turbinowych dla dużych bloków energetycznych i doboru strumienia masy wody chłodzącej do zmiennego obciążenia bloku. Optymalizacja została przeprowadzona dla warunków projektowych jak i zmiennych warunków pracy. Cel i zakres pracy zostały przedstawione w pierwszym rozdziale. W tym rozdziale został również przedstawiony aktualny stan wiedzy na temat analizowanego tematu i prace oraz wnioski przedstawione przez innych autorów, którzy też zajmowali się podobną tematyką. Doktorantka w tym rozdziale również zwróciła uwagę na pewne braki występujące w tej tematyce w literaturze, które uzupełniła w swojej rozprawie doktorskiej.

Kluczowym zagadnieniem do analiz optymalizacyjnych pracy skraplaczy turbinowych jest poprawne określenie ciśnienia pary panującego w skraplaczu. Ciśnienie to wynika z warunków pracy skraplaczy i wpływa na moc osiągalną przez turbinę i pompy wody chłodzącej. Dlatego w drugim rozdziale Doktorantka dokonała analizy porównawczej wyznaczenia ciśnienia pary

dla trzech modeli: bazującego na równaniach kryterialnych, dla modelu HEI i standardu ASME. Modele zostały sprawdzone dla danych rzeczywistych dla bloków 65MW, 120 MW i 450 MW. Na podstawie przeprowadzonych analiz okazało się, że najdokładniejsze rezultaty zostały otrzymane dla modelu HEI i ten model został zastosowany w dalszych analizach z uwzględnieniem poprawki dla spiętrzenia temperatur.

W trzecim rozdziale zostały wykonane bilanse cieplne dla dwóch analizowanych bloków energetycznych, tj.: bloku energetycznego o mocy 910 MW z turbiną kondensacyjną (blok I) i bloku energetycznego z turbiną upustowo-kondensacyjną BC50 (blok II). W rozdziale tym przedstawiono w szczegółowy sposób wyznaczenie strumieni mas, ciśnień, temperatur i entalpii w charakterystycznych punktach obiegu. W modelach zostały zastosowane bilanse masy i energii oraz zależności na spadki ciśnień i zależność Flugla-Stodoli. Modele dla tych dwóch bloków dotyczą stanów ustalonych. W rozdziale tym zamieszczono porównanie parametrów (strumienia masy, ciśnienia, temperatury i entalpii) dla wybranych punktów układu z danymi referencyjnymi. Walidacji modeli dokonano dla zmiennego obciążenia bloków energetycznych. Na podstawie porównania z danymi referencyjnymi okazało się, że zaproponowane modele z zadowalającą dokładnością odwzorowują pracę bloków energetycznych dla stanu nominalnego i dla zmiennego obciążenia. Dla bloku II (blok ciepłowniczy upustowo-kondensacyjny) brak jest komentarza dotyczącego sposobu regulacji mocy ciepłowniczej bloku. Na schemacie cieplnym bloku II występują zarówno zawór na rurociągu do wymiennika ciepłowniczego jak i prawdopodobnie przesłona regulacyjna w części NP turbiny. Te dwa elementy mają istotny wpływ na osiągi bloku w zmienionych warunkach pracy.

W celu przeprowadzenia optymalizacji pracy skraplaczy niezbędna jest znajomość oporów przepływu w instalacji wody chłodzącej oraz charakterystyk pomp. Dlatego w czwartym rozdziale zostały przedstawione układy chłodzenia dla dwóch bloków energetycznych z uwzględnieniem różnych konfiguracji połączenia skraplaczy. W rozdziale tym przedstawiono charakterystyki pomp tj. sprawności i wysokości podnoszenia w funkcji objętościowego strumienia masy.

W rozdziale piątym przedstawiono funkcję celu w postaci maksymalizacji sprawności netto bloku energetycznego i przeprowadzono szereg analiz optymalizacyjnych dotyczących połączenia skraplaczy i strumienia masy wody chłodzącej. W rozdziale tym przedstawiono przyrost sprawności brutto i netto, przyrost mocy i zysk dla zmiennego obciążenia bloku dla różnych konfiguracji połączenia skraplaczy. Wykonano analizy dla zmniejszonego przepływu wody chłodzącej w stosunku do nominalnego przepływu wody chłodzącej o 20% (brak jest komentarza dlaczego o 20% a nie np. o 15% czy 30 %). W rozdziale tym dokonano również optymalizacji przepływu wody chłodzącej dla bloków I i II. Dla optymalnych przepływów wody chłodzącej uwzględniono również ograniczenia techniczne wynikające ze stabilnej pracy innych urządzeń jak chłodni kominowych i wentylatorowych.

W szóstym rozdziale przedstawiono implementację programu do obliczeń bilansowych w środowisku Valmet DNA. W rozdziale tym krótko scharakteryzowano środowisko Valmet DNA, przedstawiono rozwiązanie zagadnienia optymalizacyjnego za pomocą algorytmów

genetycznych, przedstawiono wybrane grafiki ze stworzonego programu i wykonano obliczenia optymalizacyjne dla strumienia masy wody chłodzącej dla bloki II.

W siódmym rozdziale przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe. We wniosku końcowym najkorzystniejsza okazała się konfiguracja szeregową skraplaczy. Wniosek ten powinien zostać uzupełniony o krótki komentarz dotyczący powierzchni skraplaczy, ich długości i liczby rurek (gdyż te wartości zostały zmienione w stosunku do bazowego wariantu pracy równoległej skraplaczy). Przykładowo dla wariantów równoległego i szeregowego połączenia skraplaczy powierzchnia całkowita wymiany ciepła jest taka sama, ale zmienna jest długość skraplaczy i liczba rurek. Porównywane są skraplacze dla różnych konfiguracji połączeń, dla których następuje pewna zmiana geometrii.

2. Główne walory rozprawy doktorskiej

Do głównych walorów rozprawy doktorskiej zaliczam następujące jej elementy:

- przeprowadzenie analiz dla dwóch bloków energetycznych: bloku kondensacyjnego o mocy 910 MW i bloku upustowo-kondensacyjnego z turbiną BC50,
- stworzenie programów bilansowych dla tych dwóch bloków energetycznych dla stanów ustalonych w programie Fortran,
- przeprowadzenie analiz i walidacji z wykorzystaniem danych pomiarowych oraz danych hydraulicznych i geometrycznych instalacji,
- stworzenie programu w środowisku Valmet DNA z wykorzystaniem równań bilansowych dla bloku upustowo-kondensacyjnego. Optymalizacja była wykonywana za pomocą algorytmu genetycznego.

3. Uwagi szczegółowe do rozprawy doktorskiej

Proszę o ustosunkowanie się do następujących uwag szczegółowych dotyczących recenzowanej rozprawy doktorskiej:

1. Str. 22 – „Przy wykonaniu obliczeń założono, że wymiana ciepła ma charakter izobaryczny, brak jest przechłodzenia skroplin.” Na rysunku 2.1 oraz we wzorze (2.4) występuje temperatura t_s i t_c . Czym się różnią te temperatury? Dodatkowo na stronie 27 występuje dt_c – przechłodzenie kondensatu? Czy przechłodzenie kondensatu było uwzględnione w obliczeniach?
2. Str. 23 – zależność $t_c = t_s + 0.5 dt_m$ sugeruje, że temperatura kondensatu jest większa od temperatury pary. Nie ma przy tej zależności odwołania do literatury. W praktyce występuje większe lub mniejsze przechłodzenie skroplin czyli t_c jest równe lub mniejsze od t_s . Podobnie dla zależności $t_m = t_s - dt_{cm}$ także nie ma odwołania do literatury. W pracy mógłby zostać zamieszczony rysunek pokazujący rozkład

temperatur pomiędzy temperaturą pary i ścianki, co by ułatwiło sprawdzenie tych zależności.

3. Str. 26. Nie jest jasne dla jakich danych i dla jakiego skraplacza został przedstawiony rysunek 2.2. Czy jest to rysunek zaczerpnięty z literatury, czy wykonany na podstawie własnych obliczeń?
4. Str. 26 – zależność (2.10) $f(p_{s_obl})$, $p_s > p_{s_gr}$, warunek jest niezgodny z rysunkiem 2.2 dla $p_s > p_{s_gr}$ funkcja na rysunku ma wartość 0.
5. Str. 31. Dla obciążenia %NP 108 ciśnienie dla ref. jest równe 5.98 kPa a dla obciążenia %NP 109 jest już równe 10.44 kPa. Ten znaczący wzrost ciśnienia nie został skomentowany w pracy. Z czego wynika taki znaczący wzrost ciśnienia p_s przy zmianie obciążenia %NP ze 108 do 109?
6. Str. 32. Nie podano skąd zostały zaczerpnięte dane przedstawione (czerwone punkty) na rysunku 2.6. Dodatkowo funkcja $y=f(x)$ zawiera 6 stałych współczynników a na rysunku 2.6 A jest przedstawionych 5 punktów nasuwa się pytanie w jaki sposób wyznaczono te 6 stałych współczynników i jaką metodą?
7. Str. 34. Nie podano skąd zostały zaczerpnięte dane przedstawione (czerwone punkty) na rysunku 2.8. W jaki sposób wyznaczane jest p_{s_gr} ?
8. Str. 39 i 40. Brak jest otoczki bilansowej na rysunku 3.1 dla równań (3.1) i (3.11), co utrudnia ich sprawdzenie. W równaniu (3.11) brakuje strumienia masy $\dot{m}_k$.
9. Str. 64. Brakuje rysunku pompy wraz z osłoną bilansową z zaznaczonymi wielkościami występującymi w zależnościach (4.1)-(4.4)., co ułatwiłoby sprawdzenie tych równań. Skoro prędkość c_{g1} jest to prędkość wody w zbiorniku, a prędkość c_{g2} jest prędkością wylotową wody, ale w którym miejscu układu?
10. Str. 65. Rozdział 4.2. Dlaczego w rozdziale nie przedstawiono porównania pomiędzy mocą pobieraną przez pompę wody chłodzącej i wyliczoną z zależności (4.1)-(4.7) oraz z zależności (5.6) przynajmniej dla stanu nominalnego. Dobrze by było takie porównanie przedstawić dla zmiennego obciążenia pompy. Wydaje się, że walidacja modelu dla pompy powinna zostać przeprowadzona dla mocy pompy, ponieważ jest

to wielkość bardzo ważna dla kryterium optymalizacyjnego jakim jest moc netto bloku energetycznego.

11. Str. 67 i 70. Dlaczego przyjęto następujące wartości chropowatości $k=1$ mm i $k=0.01$ mm. Brak jest odwołania do danych literaturowych.
12. Rozdział 4.3, str. 72. Dlaczego nie przedstawiono porównania pomiędzy mocą pobieraną przez pompę wody chłodzącej i wyliczoną dla tych dwóch punktów pracy?
13. Str. 76. Dlaczego przyjęto sprawność silnika pompy równą $\eta_{m_CWP} = 0.75$? Na stronie 102 sprawność silnika pompy przyjęto jako $\eta_{m_CWP} = 0.89$. Z czego wynika przyjęcie tak różnych wartości sprawności silnika pompy? Sprawność silnika pompy wpływa na moc pompy i na sprawność netto bloku. Brak jest odwołania do literatury.
14. Str. 113. „Populacja startowa: została utworzona na podstawie danych obiektowych” – Jak należy rozumieć pojęcie dane obiektowe?

4. Uwagi redakcyjne

Rozprawa doktorska jest sformatowana poprawnie. Poniżej przedstawiam swoje uwagi redakcyjne.

Str. 10 – „Różnica temperatury kondensat i ścianki” – Różnica temperatury kondensatu i ścianki,

Str. 10 - „Entalpia” – entalpia właściwa,

Str. 11 – „Średnia napędowa różnica temperatur czynni” – czynnika,

Str. 12 – „Entropia, kJ/kg K” – entropia właściwa, kJ/(kg K),

Str. 12 – „kW/m² K” – kW/(m² K),

Str 12 – „przepływ objętościowy, m²/s” – powinno być m³/s,

Str. 16 – „.....w niższych zakresach regulacji” – chyba powinno być w niższych zakresach obciążenia,

Str. 16 – „.....doregulowania parametrów wejściowych” – nie jest jasne o jakie parametry chodzi,

Str. 18 – „.....oraz regulacji wody chłodzącej” – regulacji strumienia wody chłodzącej,

Str. 19 – „.....modernizacją obiektów klasy 200MW” – bloków klasy 200MW,

Str. 20 – „.....minimalizacji egzergii” – powinno być minimalizacji strat egzergii,

Str. 24 – „.....zrozumieniem szerokiej gamy urządzeń” – jak to należy rozumieć,

Str. 24 – „Żaden parametr termodynamiczny pary lub kondensatu nie ma wpływu na wynik obliczeń” – nie jest uwzględniony w modelu,

Str. 26 – „Funkcja ma postać opisaną wzorem (2.10) i przyjmuje wartości dodatnie powyżej ciśnienia granicznego, dla którego korekta nie jest wymagana”. – nie rozumiem tego zdania,

Str. 40. W równaniu (3.2) jest $\dot{m}_{133}$ a powinno być $\dot{m}_{143}$,

Str. 40. W równaniu (3.3) jest $\dot{m}_{143}$ a powinno być $\dot{m}_{133}$,

Str. 39. Można było w pracy skomentować, dlaczego oprócz punktów 80, 93 i 95 pojawiają się jeszcze punkty 80.1, 93.1, 95.1,

Str. 44, 46, 47, 51, 52, 53 jest „entalpii” -powinno być entalpii,

Str. 47 Tabela 3.3b- „74=tsat_p(133)-dts_LPH1” – powinno być tsat_p(143),

Str. 47 Tabela 3.3b- „75=tsat_p(143)-dts_LPH2” – powinno być tsat_p(133),

Str. 48. Można było w pracy skomentować, dlaczego oprócz punktu 15 pojawia się jeszcze punkty 15.1,

Str. 49. W równaniu (3.17) przy entalpii i17 dla strumienia masy brakuje indeksu dolnego,

Str. 49. W równaniu (3.23) występuje parametr r1, który występuje również na stronie numer 50 w tabeli i równaniu (3.23a) – chyba powinno być x1,

Str. 54. Podrozdział 3.3.2. Czy jest zasadne tworzenie podrozdziału dla jednego zdania,

Str. 62 – „Najwyższe błędy otrzymano dla obliczeń ciśnienia pary w upustach 33 i 44” – 44 to jest wylot z turbiny,

Str. 64 – podrozdział 4.1. „Wyznaczanie charakterystyki instancji” – powinno być instalacji,

Str. 69. Podpis pod rysunkiem 4.9 – „Charakterystyka pompy wody chłodzącej dla bloku II”- powinno być dla bloku I,

Str. 73. – „Najpierw wdrożono obejścia wody” – bardziej poprawnie by było założono,

Str. 74. Tabela 5.1 jest $\dot{m}_g$ a powinno być jest $\dot{m}_s$,

Str. 102. – „dla zakresu racji bloku” – pracy,

Str. 102. – „Wartość przepływu minimalizująca wskaźnik ”- chyba maksymalizująca,

Str. 125 – „ Przedstawiony program został wykonany dla badanego o bloku energetycznego...” – litera „o” wydaje się być niepotrzebna,

Str. 136 i 138 – Czy na pewno w tabelach B1.3 i B2.3 ciśnienie p_g jest w MPa?,

Str. 138 – w tabelach B2.3 nie podano jednostek dla ciśnienia p_o .

5. Uwagi końcowe

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek dotyczy interesującego zagadnienia połączenia różnych konfiguracji skraplaczy i optymalizacji przepływu wody chłodzącej dla zmiennego obciążenia bloku energetycznego. Cel pracy jest jasno sformułowany a metody badawcze zastosowane do realizacji celu pracy zostały dobrze dobrane i zastosowane. Rozprawa doktorska jest poprawnie podzielona na rozdziały. W pracy znajdują się drobne usterki w piśmiennictwie (wykazane powyżej), ale nie mają one wpływu na wartość naukową rozprawy doktorskiej. Doceniam duży nakład pracy jaki Doktorantka włożyła w wykonanie licznych analiz. Analizy przeprowadzone przez Doktorantkę mają praktyczne zastosowanie, czego przykładem jest implementacja modelu w środowisku Valmet DNA w celu określania optymalnego strumienia wody chłodzącej dla zmiennego obciążenia bloku. Rozprawa doktorska pod tytułem „Optymalizacja pracy skraplaczy turbinowych w pełnym paśmie regulacji obciążenia” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a Pani mgr inż. Ewa Dobkiewicz-Wieczorek wykazała się znaczącą wiedzą teoretyczną i umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty przedstawione w recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania, jakie Ustawa z dnia 20 lipca 2018 Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka stawia rozprawie doktorskiej.

Wobec powyższego wnioskuję o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Jednocześnie zgłaszam do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej wniosek o wyróżnienie Doktorantki Pani mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek za recenzowaną przez mnie rozprawę doktorską.

Wniosek uzasadniam następująco:

- Doktorantka stworzyła programy w oparciu o równania bilansowe dla dwóch bloków energetycznych (bloku kondensacyjnego o mocy 910 MW i bloku upustowo-kondensacyjnego z turbiną BC50) dla stanów ustalonych w programie Fortran,
- Pani mgr inż. Ewa Dobkiewicz-Wieczorek przeprowadziła szereg analiz i walidacji modeli z wykorzystaniem danych pomiarowych oraz danych hydraulicznych i geometrycznych instalacji,
- Doktorantka stworzyła program w środowisku Valmet DNA z wykorzystaniem równań bilansowych dla bloku upustowo-kondensacyjnego i przeprowadziła optymalizację przepływu wody chłodzącej dla zmiennego obciążenia bloku za pomocą algorytmu genetycznego. Stworzony program może zostać zastosowany w przemyśle.

Dr hab. inż. Rafał Laskowski, profesor uczelni