

Prof. dr hab. inż. Dawid Taler  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Katedra Procesów Ciepłych,  
Ochrony Powietrza i Utylizacji Odpadów  
Ul. Warszawska 24  
31-155 Kraków  
tel. 0048 12 628 30 26  
e-mail: dawid.taler@pk.edu.pl

Kraków, 26.02.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Trawińskiego  
pt. „Analityczno-aproksymacyjny model matematyczny bloku gazowo-parowego dla  
celów diagnostyczno-ewaluacyjnych“**

Recenzowana rozprawa o objętości 210 stron napisana jest w języku polskim. Składa się z dziewięciu rozdziałów oraz spisu literatury cytowanej zawierającej 190 pozycji literaturowych. Na początku rozprawy znajdują się jej streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów.

W rozprawie opracowany został model matematyczny bloku gazowo-parowego, w którym uwzględnione zostały modele matematyczne następujących podzespołów: sprężarki, komory spalania, turbiny gazowej, odzysknicowego kotła parowego o trzech stopniach ciśnienia oraz turbiny parowej. Dużo uwagi poświęcono wyznaczaniu właściwości cieplnych powietrza, paliwa gazowego i spalin oraz wody i pary. Opracowany w rozprawie model matematyczny bloku gazowo-parowego umożliwi symulację jego pracy przy obciążeniu nominalnym, jak i obciążeniach częściowych.

Tematyka pracy jest ważna oraz aktualna i może stanowić przedmiot rozprawy doktorskiej. Recenzowana rozprawa ma duże znaczenie praktyczne.

## **1. Charakterystyka rozprawy**

W rozdziale pierwszym omówiony został blok gazowo-parowy w Elektrociepłowni Żerań, którego model matematyczny opracowany został w recenzowanej rozprawie. Przedstawiony został uproszczony układ cieplny bloku gazowo-parowego w Elektrociepłowni Żerań. Elektryczna moc osiągalna tego bloku wynosi 497 MW, a osiągalna moc cieplna 326 MW.

W rozdziale drugim sformułowany został cel rozprawy i omówiona została krótko treść poszczególnych rozdziałów. Na stronie 16 Kandydat podał następujący cel rozprawy:

„Celem rozprawy doktorskiej jest wypracowanie analityczno-aproksymacyjnego podejścia do opracowania modelu matematycznego złożonej instalacji energetycznej na przykładzie bloku gazowo-parowego dla Elektrociepłowni Żerań”.

Modelowanie matematyczne układów gazowo-parowych stanowi przedmiot rozdziału trzeciego. Ogólne zasady konstrukcji modelu matematycznego przedstawione zostały

w paragrafie 3.1. Przegląd literatury przeprowadzony w paragrafie 3.2 obejmuje prace z zakresu układów parowo-gazowych, turbozespołów gazowych oraz turbozespołów parowych.

Czynniki robocze oraz równania stanu dla gazu rzeczywistego omówiono krótko w rozdziale czwartym.

W modelowaniu układu gazowo-parowego wykorzystywane były trzy równania stanu gazu rzeczywistego:

- Redlicha-Kwonga dla powietrza atmosferycznego,
- Lee-Kesslera dla gazu ziemnego wysokometanowego,
- Soave-Redlicha-Kwonga dla gazów spalinowych.

Właściwości fizyczne pary obliczane były z wykorzystaniem tablic i programów IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam).

Turbozespół gazowy M701F5 wyprodukowany przez firmę Mitsubishi Hitachi Power Systems (MHPS) opisany jest w rozdziale piątym. Nominalna moc elektryczna turbozespołu wynosi 359 MW. Sprawność elektryczna turbozespołu wynosi 41,7%. Sprężarka osiowa powietrza ma 17 stopni a turbina gazowa ma 4 stopnie. Temperatura gazów spalinowych powstających w wyniku spalania gazu ziemnego wysokometanowego dochodzi na wlocie do turbiny do 1500°C. Łopatki pierwszych trzech stopni turbiny chłodzone są od wewnątrz powietrzem pobieranym ze sprężarki. Dodatkowo powierzchnia łopatek w pierwszych trzech stopniach pokryta jest cienką warstwą ochronną nakładaną plazmowo (z ang. TBC - Thermal Barrier Coating). W kolejnych paragrafach rozdziału piątego przedstawiono proste modele zespołu filtrów wlotowych powietrza, kierownicy wlotowej IGV (z ang. Inlet Guide Vane), układu przepływowego sprężarki osiowej oraz chłodnicy powietrza TCA (z ang. Turbine Cooling Air Cooler). Przedmiotem paragrafu 5.6 są charakterystyki sprężarki osiowej. Obliczenia cieplne układu paliwa gazowego przedstawione są w paragrafie 5.7. Podstawowe wzory do obliczania zespołu komór spalania opisano krótko w paragrafie 5.8. Równania do modelowania rozprężania gazów spalinowych zestawiono w paragrafie 5.9. Wieńce, kierowniczy i wirujący, każdego stopnia turbinowego rozpatrywano oddzielnie. W nieruchomym wieńcu kierowniczym czynnik roboczy (spaliny) nie wykonuje pracy. Praca jest wykonywana przez czynnik roboczy tylko w wieńcach wirujących. Wyznaczanie mocy teoretycznej i sprawności stopnia turbinowego omówione jest w paragrafie 5.10. Wyznaczanie charakterystyk turbiny gazowej stanowi przedmiot paragrafu 5.11. Blok ograniczeń termicznych dla turbiny gazowej omówiono krótko w paragrafie 5.12. W paragrafie 5.13 podano wzory do obliczania mocy netto wewnętrznej i elektrycznej turbozespołu gazowego.

W rozdziale szóstym przedstawiono model obliczeniowy parowego kotła odzysknicowego zainstalowanego za turbiną gazową. Jest to kocioł walczakowy z obiegiem naturalnym wyposażony w układ wtórnego przegrzewu pary. Dzięki zastosowaniu trzech parowników z oddzielnymi walczakami pracującymi przy różnych ciśnieniach temperatura spalin na wylocie z kotła jest niska, a zatem sprawność kotła jest wysoka. Maksymalne ciśnienie i temperatura pary świeżej wynoszą odpowiednio 17 MPa i 565°C. W celu podwyższenia sprawności kotła wykorzystywany jest ekonomizer podgrzewu wody sieciowej oraz ekonomizer podgrzewu paliwa gazowego (gazu ziemnego). Rozdział szósty obejmuje modele cząstkowe poszczególnych powierzchni ogrzewalnych. Wszystkie modele cząstkowe stosują

metodę obliczeń wymienników ciepła, bazującą na średniej logarytmicznej różnicy temperatur między obydwoma czynnikami. Ponadto uwzględnia się wzór na strumień ciepła oddawany przez czynnik o wyższej temperaturze oraz wzór na strumień ciepła przejmowany przez czynnik o niskiej temperaturze. Na cały model kotła odzysknicowego składają się modele cząstkowe następujących wymienników ciepła:

- podgrzewaczy wody zasilającej, w tym podgrzewacza wody NP, podgrzewacza SP oraz podgrzewaczy WP1, WP2, WP3 i WP4,
- parowników i walczaków, w tym: walczaka i parownika niskoprężnego, walczaka i parownika średnioprężnego oraz walczaka i parownika wysokoprężnego,
- przegrzewaczy pary, w tym: przegrzewacza pary świeżej NP, przegrzewacza pary świeżej SP1, wtórnego przegrzewacza pary SP2, wtórnego przegrzewacza pary SP3, przegrzewaczy pary świeżej WP1 i WP2, schładzacza międzystopniowego pary wtórnie przegrzanej SP i pary pierwotnej WP,
- ekonomizera do podgrzewu wody sieciowej,
- ekonomizera do podgrzewu paliwa (gazu ziemnego).

Przedmiotem rozdziału siódmego jest turbozespół parowy DST-S10. W paragrafie 7.1 omówiono krótko konstrukcję turbiny. W paragrafie 7.2 przedstawiono modele matematyczne grup stopni turbinowych. Podstawą modelowania poszczególnych stopni jest prawo Stodoli-Flügela, które pozwala wyznaczyć strumień masy pary przepływającej przez turbinę, po zmianie nominalnych parametrów pary na wlocie do turbiny. Szczegółowo przedstawiony został model matematyczny części wysokoprężnej turbiny WP, części średnioprężnych SP1 i SP2 oraz części niskoprężnych NP1, NP2 i NP3. W paragrafie 7.3 przedstawiony jest model obliczeniowy stacji redukcyjno-schładzającej. W paragrafie 7.4 omówiono obliczenia kondensatora turbiny stanowiącego pierwszy stopień podgrzewania wody sieciowej oraz kondensator pary upustowej zasilanej parą wylotową części turbiny NP2, który stanowi drugi stopień podgrzewania wody kierowanej do miejskiej sieci ciepłowniczej. Przedmiotem paragrafu 7.5 jest obliczanie wymiennika przeciwprądowego płaszczowo-rurowego o dwóch biegach, którego zadaniem jest schładzanie wody sieciowej kierowanej z przewodu zasilającego sieć do przewodu powrotnego z sieci. Wymiennik ten zwany „wymiennikiem pseudokondensacji” umożliwia zmniejszanie strumienia wody gorącej zasilającej sieć ciepłowniczą.

Wyniki symulacji komputerowych bloku gazowo-parowego w Elektrociepłowni Żerań przedstawiono w rozdziale ósmym. Przeprowadzono weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu obliczeniowego elektrowni oraz przedstawiono wybrane charakterystyki (osiągi) turbozespołu gazowo-parowego. W paragrafie 8.6 wyznaczone zostały obszary możliwej eksploatacji bloku gazowo-parowego.

Podsumowanie i wnioski przedstawione zostały w rozdziale dziewiątym.

## **2. Charakterystyka najważniejszych osiągnięć naukowo-badawczych przedstawionych w rozprawie**

Mgr inż. Paweł Trawiński opracował model matematyczny bloku gazowo-parowego zainstalowanego w Elektrociepłowni Żerań. Umożliwia on symulację pracy bloku przy

różnych obciążeniach elektrycznych i cieplnych. Stosując opracowany model można diagnozować procesy przeplywowo-ciepne zachodzące w poszczególnych zespołach jednostki. Symulacja pracy bloku gazowo-parowego za pomocą opracowanego programu komputerowego jest skutecznym narzędziem w wykrywaniu nieprawidłowości w pracy bloku, jak również w optymalizacji jego pracy. Uproszczone modele matematyczne poszczególnych komponentów bloku bazują na równaniu zachowania masy i energii w warunkach ustalonych, równaniach empirycznych (konstrytywnych) i odpowiednich warunkach brzegowych. Właściwości fizyczne czynników roboczych, takich jak: powietrze, gaz ziemny wysokometanowy, spaliny, woda i para wodna wyznaczone były z wykorzystaniem równań stanu dla gazu rzeczywistego. Właściwości fizyczne pary wodnej obliczane były zgodnie ze standardem opracowanym przez IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam).

W modelu wykorzystano dane pomiarowe zarejestrowane w czasie pierwszego roku eksploatacji, które były archiwizowane w rozproszonym systemie sterowania bloku (z ang. w układzie DCS – Distributed Control System). Mierzonych było 309 wielkości w stanie zbliżonym do ustalonego a liczba zarejestrowanych punktów pomiarowych wynosiła 45 515. Zaletą opracowanego modelu matematycznego jest wyznaczanie współczynników w zależnościach empirycznych za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Wartości poszukiwanych parametrów w równaniach empirycznych wyznaczone były z warunku minimalizacji sumy kwadratów różnic między wartościami zmierzonymi a obliczonymi wybranych parametrów, takich jak temperatury, ciśnienia lub strumienie przepływu czynników roboczych. Do minimalizacji sumy kwadratów i wyznaczania wartości poszukiwanych parametrów w równaniach empirycznych zastosowano iteracyjny algorytm Broydena-Fletcher-Goldfarba-Shanno dostępny w bibliotece zewnętrznej języka Python.

Ważnym osiągnięciem Kandydata jest opracowanie własnego modelu matematycznego ekspansji gazów spalinowych i propozycja nowej metody wyznaczania mocy teoretycznej i sprawności wewnętrznej dla stopni turbinowych z otwartymi układami chłodzenia.

Mgr inż. Paweł Trawiński wykorzystał w budowie modelu matematycznego bloku dostępną dokumentację techniczno-ruchową, zestaw bilansów gwarantowanych oraz instrukcje eksploatacyjne udostępnione przez generalnego wykonawcę inwestycji. W opracowaniu modelu Kandydat wykorzystał również wiedzę nabytą podczas pracy zawodowej na stanowiskach eksploatacyjnych i dozorowych w Elektrociepłowni Żerań. Opracowany model matematyczny zapewnia dobre odwzorowanie rzeczywistej pracy bloku. Umożliwia on wyznaczenie dopuszczalnego obszaru eksploatacji bloku gazowo-parowego w funkcji wybranych parametrów wejściowych.

### 3. Uwagi krytyczne

Pomimo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej Kandydata mam również pewne uwagi krytyczne, które wynikają głównie z obszernego zakresu prac teoretycznych i eksperymentalnych związanych z realizacją rozprawy. Są to następujące uwagi krytyczne:

- Terminologia stosowana w pracy nie zawsze jest poprawna.  
W wykazie oznaczeń na stronie 9 zamiast „ $U$  – współczynnik wymiany ciepła” powinno być „ $U$  – współczynnik przenikania ciepła”. Zamiast „ $\lambda$  - przewodność cieplna” powinno być „ $\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła”.
- Literatura dotycząca właściwości pary cytowana na dole strony 32 jest dosyć stara.

- Do obliczania liczby Nusselta od strony wody, pary i wrzącej wody zastosowano wzór Dittusa-Boeltera. Wzór ten jednak można stosować do przepływów jednofazowych. Współczynnik wnikania ciepła na wewnętrznych powierzchniach rur parownika kotła jest o wiele większy w porównaniu z wartością tego współczynnika obliczoną według wzoru Dittusa-Boeltera (6.7). Na podstawie własnych pomiarów przeprowadzonych w Elektrowni Skawina otrzymano wartość współczynnika wnikania ciepła równą  $30\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .
- Do obliczania współczynnika wnikania ciepła od strony spalin zastosowano wzór Schmidta (6.8). Pominięto całkowicie radiacyjny współczynnik wnikania ciepła, który powinien być dodany do konwekcyjnego współczynnika wnikania ciepła obliczanego za pomocą wzoru (6.9).
- Tytuł rozdziału 7.5 „Wymiennik pseudokondensacji” jest mylący, gdyż jak wynika ze schematu przedstawionego na rysunku 7.2 jest to przeciwprądowy wymiennik ciepła typu woda-woda stosowany do obniżenia temperatury gorącej wody zasilającej sieć ciepłowniczą przed zmieszaniem jej z wodą powrotną z sieci o niższej temperaturze.

Zauważone usterki nie zmniejszają merytorycznej wartości rozprawy.

#### 4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Trawińskiego spełnia wszystkie wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój modelowania matematycznego parowo-gazowych bloków ciepłowniczych.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr inż. Pawła Trawińskiego do publicznej obrony swojej rozprawy i o nadanie Mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

*David Taler*