

## **Recenzja**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Simy Shabani

pt.: „Analysis of the blade geometries for a highly efficient wet steam turbine stage”

### **1. Charakterystyka rozprawy**

Przedmiotem rozprawy doktorskiej mgr inż. Simy Shabani jest analiza geometrii łopatek ostatniego stopnia turbiny parowej niskiego ciśnienia pod kątem zmian parametrów jej pracy. Praca łączy badania eksperymentalne z zaawansowanym modelowaniem numerycznym, koncentrując się na poprawie wydajności stopnia turbiny parowej pracującego w warunkach występowania zjawisk kondensacyjnych, w których tworzenie się pary mokrej prowadzi do znacznych spadków sprawności. Motywacją do podjęcia tych badań była potrzeba udoskonalenia narzędzi numerycznych służących do przewidywania zjawisk kondensacji oraz optymalizacji konfiguracji łopatek w celu zminimalizowania strat energii i ryzyka erozji mechanicznej. Głównym celem badawczym było zweryfikowanie modeli numerycznych stosowanych do symulacji przepływów z kondensacją pary. Znajomość tych zagadnień ma istotne znaczenie praktyczne, dostarczając inżynierom wiedzy i narzędzi niezbędnych do projektowania oraz optymalizacji maszyn, w których zachodzą procesy kondensacji pary. Dlatego też podjęcie przez doktorantkę badań w tym zakresie należy uznać za w pełni uzasadnione.

We wprowadzeniu i przeglądzie literatury (rozdział 1) autorka przedstawia podstawy przepływu pary mokrej w turbinach osiowych oraz podsumowuje stan badań nad modelowaniem kondensacji, stratami termodynamicznymi i optymalizacją łopatek. Szczególny nacisk położono na modele numerycznej mechaniki płynów (CFD) i równania stanu, a także na ich ograniczenia w zastosowaniach przemysłowych. Analiza ta określa cel pracy doktorskiej: zidentyfikowanie dokładnych metod modelowania i zaproponowanie zoptymalizowanych geometrii łopatek dla turbin parowych z kondensacją pary. Rozdział 2

przedstawia badania eksperymentalne przeprowadzone w specjalnym tunelu parowym na Politechnice Śląskiej. Przedstawiono różne techniki pomiarowe, w tym metodę ekstynkcji światła (LEM) do pomiaru średniej średnicy kropeł i udziału fazy mokrej, oraz wizualizację przepływu schlieren'a. Autorka szczegółowo opisuje procedury kalibracji i testy walidacyjne, zapewniające wysoką dokładność pomiarów wielkości i rozkładu kropeł. W tym rozdziale zaprezentowano również wyniki dla przypadków testowych tj. dyszy zbieżno-rozbieżnej i palisady łopatkowej, stanowiące podstawę do porównania z modelami numerycznymi. W rozdziale 3 autorka ocenia różne podejścia CFD, porównując wbudowane modele w kodach komercyjnych i modele własne. Dokładność kilku modeli wzrostu kropeł oraz równań stanu została sprawdzona w odniesieniu do wyników eksperymentalnych, podkreślając ich mocne strony i ograniczenia. Ta systematyczna analiza prowadzi do zaleceń dotyczących wyboru najbardziej niezawodnych modeli numerycznych do zastosowania w praktyce inżynierskiej.

W rozdziale 4 przedstawiono trójwymiarowe symulacje CFD przepływu pary mokrej przez ostatni stopień turbiny parowej. Przeprowadzona analiza obejmuje trójkąty prędkości, termodynamikę, wielkości siatki oraz porównania przepływów diabatyicznych i adiabatycznych. Wyniki dostarczają cennych informacji na temat mechanizmów strat w rzeczywistych geometriach turbin. Najważniejszą częścią rozprawy jest rozdział 5, poświęcony ocenie wpływu modyfikacji geometrii łopatek kierownicy na sprawność stopnia. Przeprowadzona szczegółowa analiza pozwoliła określić najlepszą geometrię łopatki, przy której uzyskujemy największe zmniejszenie strat energii i poprawę wydajności stopnia.

Na koniec pracy (rozdział 6) podsumowano przeprowadzone badania oraz przedstawiono kluczowe wnioski, podkreślając najlepsze modele CFD do symulacji przepływu z kondensacją, lepsze zrozumienie strat przepływu w parze mokrej oraz praktyczne zalecenia dotyczące optymalizacji łopatek. Praca stanowi zarówno wkład naukowy, jak i wytyczne dla inżynierów dotyczące projektowania bardziej wydajnych turbin parowych.

## **2. Ocena pracy**

Tytuł pracy doktorskiej, „Analiza geometrii łopatek dla wysokowydajnego stopnia turbiny parowej mokrej”, dobrze odzwierciedla zakres i treść badań, jednak mogłoby również zawierać odniesienie w jakim kontekście odbywa się analiza. Praca ma logiczną strukturę i zawiera wszystkie istotne elementy pracy naukowej: przegląd literatury, jasno sformułowane cele, opis metodologii badań, szczegółową analizę wyników oraz podsumowanie wraz z wnioskami. Pod tym względem rozprawę można uznać za kompletną i dobrze skomponowaną.

Badania eksperymentalne, przeprowadzone w tunelu parowym, są starannie zaplanowane i dostarczają wiarygodnych danych na temat przepływów pary mokrej. Autorka z powodzeniem zastosowała zaawansowane techniki pomiarowe, takie jak metoda ekstynkcji światła i wizualizacja przepływu, zapewniając wysoką jakość wyników eksperymentalnych. Zakres badanych przypadków, w tym pomiary w dyszy i palisadzie łopatkowej, jest wystarczający do przeprowadzenia walidacji modeli numerycznych. Badania numeryczne są obszerne i przeprowadzone w sposób systematyczny. Doktorantka porównała i oceniła kilka komercyjnych i wewnętrznych modeli CFD w odniesieniu do wyników eksperymentalnych. Rozprawa zawiera dokładną analizę modeli wzrostu kropel (takich jak Gyarmathy'ego, Fuchsa-Sutugina i Younga) i równań stanu. Chociaż można było rozważyć dalsze poszerzenie zakresu symulacji, przedstawiony zakres jest odpowiedni i pozwala na wyciągnięcie znaczących wniosków.

Szczególnie cenne są analizy modyfikacji geometrii łopatek, prowadzone zarówno w dwóch, jak i trzech wymiarach. Badania te pokazują, że nawet niewielkie zmiany w konstrukcji łopatek kierownicy mogą wyraźnie wpływać na sprawność stopnia turbiny. Przeprowadzona szczegółowa analiza umożliwiła sformułowanie praktycznych zaleceń dotyczących optymalnych konfiguracji, stanowiąc oryginalny i wartościowy wkład w rozwój inżynierii turbozespołów.

Podsumowując, rozprawa jest dobrze przygotowana, naukowo pozostawia pewien niedosyt, ale za to przedstawia oryginalne wyniki, które podkreślają istotny wpływ kondensacji pary na przepływ w turbinach parowych, prowadzący do zmian parametrów przepływu, zwiększonych strat i zmniejszenia sprawności. Dlatego moja ocena tej rozprawy doktorskiej jest pozytywna.

### **3. Dyskusja i uwagi szczegółowe**

Chociaż rozprawa jest napisana poprawnie i zawiera istotne wyniki oryginalnych badań, kilka kwestii zasługuje na dalszą dyskusję.

W opisie badań numerycznych 3D można znaleźć informację o testach wielkości siatki, kryteriach wyboru modeli turbulencji. Jednak w rozdziale 3 przy poszukiwaniu odpowiednich modeli numerycznych taka analiza nie została przedstawiona. Dla pełnego obrazu ustawień kodu obliczeniowego należałoby by jeszcze podać wartości  $y^+$  dla poszczególnych ścian, warunki brzegowe dla modeli turbulencji oraz jakie były kryteria wyboru takich a nie innych warunków?

W rozdziale 3.4 autorka porównuje wyniki obliczeń z różnymi modelami wzrostu kropeł z wynikami eksperymentalnymi i konkluduje, że jedne modele dobrze przewidują lokalizacje fali kondensacyjnej, a inne jej intensywność. W tym miejscu byłbym ostrożny z wyciąganiem takich wniosków, ponieważ w badaniach eksperymentalnych prawdopodobnie występuje zjawisko oscylacji fali kondensacyjnej, a to z kolei powoduje rozmycie rozkładu mierzonego ciśnienia. Z kolei w stacjonarnych symulacjach numerycznych zjawisko oscylacji fali zapewne nie występuje.

Ocena modeli kondensacji i wzrostu kropeł została przedstawiona szczegółowo, jednak analiza porównawcza pozostaje czasami jakościowa. Przy omawianiu wyników przydałoby się więcej dyskusji naukowej nad ograniczeniami i uproszczeniami poszczególnych modeli, dlaczego otrzymujemy dla niektórych modeli lepszy rozkład ciśnienia, a dla innych lepszy rozkład średniej średnicy kropeł. Niemniej jednak autorka przedstawia dyskusję o modelach wzrostu kropeł we wstępie pracy oraz rozdziale 3, aczkolwiek praca zyskałaby na jakości gdyby taką dyskusję przywołać przy omawianiu wyników badań.

Symulacje numeryczne ostatniego stopnia turbiny, choć obszerne, zostały przeprowadzone dla ograniczonego zakresu warunków pracy. W praktyce turbiny 200 MW pracują w ciągu doby przy zmiennym zakresie obciążeń. Czy parametry obliczeniowe w rozprawie odnoszą się do nominalnych warunków pracy? Czy mniejsze masowe natężenie przepływu sprzyja czy pogarsza warunki kondensacji w ostatnim stopniu turbiny?

Ponadto z opisu domeny obliczeniowej i rys. 4.4 można wywnioskować, że ostatni stopień, to w istocie też stopień Bauamana z tymi samymi wymiarami, tylko bez części podziału na przedostatnim stopniu. Jaki jest cel tego zabiegu, bo nie jest to wystarczająco wyjaśnione w rozprawie. W typowej modernizacji turbiny 200 MW, m.in. przez Alstom, stopień Baumanna został zastąpiony pełnym stopniem reakcyjnym, cały strumień pary przepływa przez ostatni wirnik, łopatki ostatniego stopnia wydłużono, a średnica jego wzrosła.

Rozprawa zawiera wiele rysunków i tabel, jednak czasami materiał wydaje się zbyt szczegółowy lub powtarzalny. Bardziej zwięzły wybór i wyraźniejsze zintegrowanie materiałów graficznych poprawiłoby czytelność i zapewniło większą widoczność kluczowych wyników badań. Czasami można odnieść wrażenie, że autorka trochę się spieszyła i np.:

- na str. 36 wprowadza się pojęcie średnicy kropli Sauter'a bez jego definicji;
- na str. 49 autorka wprowadza obliczeniowe przypadki testowe z modelami wzrostu kropeł, a tabela z zestawieniem tych przypadków znajduje się 6 stron dalej na stronie 55;

- na str. 107 można znaleźć takie wnioski: ... obecność kondensacji zwiększa intensywność fal uderzeniowych, oraz 'pojawienie się kondensacji znacznie obniża liczbę Macha'. Wzrost intensywności fali powiązany jest z większą liczbą Macha przed falą, to jak się ma to wyrażenie do spadku liczby Macha?

#### **4. Wniosek końcowy**

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest samodzielnym rozwiązaniem złożonego problemu naukowego, a uzyskane wyniki stanowią oryginalny wkład autorki w rozwój wiedzy w dziedzinie obliczeń stopni turbin parowych i poprawy geometrii łopatek. Wyniki mają zarówno wartość poznawczą, jak i praktyczną, a analiza wyraźnie pokazuje, że określone cele pracy doktorskiej zostały pomyślnie osiągnięte.

Przeprowadzone badania potwierdzają wszechstronną wiedzę doktorantki zarówno w zakresie modelowania numerycznego, jak i badań eksperymentalnych. Doktorantka przeprowadziła wymagające badania eksperymentalne w specjalistycznym tunelu parowym, wykorzystując zaawansowane techniki pomiarowe, oraz wykazała się znajomością zagadnień związanych z modelowaniem przepływów pary mokrej w złożonych, trójwymiarowych geometriach turbin. Otrzymane wyniki zostały właściwie zinterpretowane, a sformułowane wnioski są naukowo uzasadnione i istotne dla dalszego rozwoju technologii turbozespołów. Uwagi przedstawione w recenzji nie umniejszają wartości naukowej rozprawy ani nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę pracy.

**Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Simy Shabani spełnia wymagania ustawy (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz. U. z 2018 t. poz. 1668 ze zm.) o stopniach i tytułach naukowych stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.**

Ryszard Szwaba

