

Rzeszów, 9-09-2025r.

Recenzja pracy doktorskiej

pt.:

Analysis of the blade geometries for a highly efficient wet steam turbine stage (*“Analiza geometrii łopatek dla stopnia turbiny parowej o podwyższonej sprawności”*)

1. PRZEDMIOT RECENZJI I PODSTAWA OPRACOWANIA

1.1. Tytuł rozprawy oraz podstawa jej opracowania

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Sima Shabani pt.: Analysis of the blade geometries for a highly efficient wet steam turbine stage (*“Analiza geometrii łopatek dla stopnia turbiny parowej o podwyższonej sprawności”*). Pracę wykonano w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych (IMiUE) na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Recenzję opracowano na podstawie umowy o dzieło Nr UMC/2614/2025 z dnia 22.07.2025r., zawartej pomiędzy Politechniką Śląską w Gliwicach, reprezentowaną przez prof. dra hab. inż. Mariusza Dudziaka, a niżej podpisanym jej wykonawcą.

1.2. Ocena układu rozprawy

Zredagowana w języku angielskim praca doktorska Pani mgr inż. Simi Shabani, obejmuje łącznie sześć rozdziałów i 151 stron. Na początku pracy umieszczono afiliację, spis treści oraz wykaz oznaczeń i skrótów. Całość pracy kończy podsumowanie i wnioski, spis literatury oraz wykaz rysunków i tablic a także streszczenie w języku polskim i angielskim. Jej układ jest zasadniczo logiczny i poprawny z wydzieloną częścią badań stanowiskowych i częścią obliczeniową z uzasadnieniem wyboru opisu modelu ośrodka dwufazowego i testowaniem narzędzi zastosowanych do analizy wybranych przypadków.

Wprowadzenie do tematyki pracy stanowi Rozdział 1. Oprócz przeglądu literatury dotyczącej stanu badań i modelowania numerycznego przepływów pary mokrej (wet steam flows – WSF) w turbinach parowych, opisano główne problemy i kierunki ich rozwoju. Jak wskazano w oparciu o aktualny stan wiedzy i wyniki badań wielu ośrodków i własnych (m.in. we współpracy z PŚI), podjęte w tej rozprawie kwestie są bardzo aktualne i ważne.

W Rozdziale 2, doktoranka opisała testy i techniki w pomiarach eksperymentalnych przepływu z kondensacją pary wodnej, a w szczególności użyte przez nią metody optyczne oparte o rozpraszanie światła (LEM) dla identyfikacji koncentracji oraz rozmiaru i szybkości generacji kropli kondensatu. Istotnym problemem jest tu akwizycja danych i kalibracja układu pomiarowego. Ich celem była implementacja odpowiednich zależności wprowadzanych do równań transportu w obliczeniach przepływu 2D i 3D w kanałach wewnętrznych elementów turbin parowych. Kwestie modelowania przepływów dwufazowych pary wodnej w elementach turbin parowych, są od wielu lat przedmiotem zainteresowań przemysłu i wielu ośrodków badawczych na świecie.

W pracy dokonano walidacji zaproponowanych wcześniej modeli turbulencji i dynamiki procesu kondensacji pary, w tym generowania i wzrostu kropeł wody w przepływie pary wodnej. Uzyskane wyniki wykazują w tym względzie dobrą zgodność z aktualnie dostępnymi danymi. Rozpatrzono też modele wzrostu kropli wody w przepływie dla modelu ciągłego, kinetycznego i mieszanego. Ograniczone informacje z badań w tym zakresie nie zawsze prowadzą do jednoznacznych wskazań, pozwalających ocenić, który z modeli powinien być stosowany w odniesieniu do specyfiki rozpatrywanych zagadnień aerodynamiki maszyn przepływowych.

Niniejsza praca mieści się w głównym nurcie tych badań, a główną i oryginalną część pracy zawierają Rozdziały 2 - 5. Eksperymenty laboratoryjne (Rozdział 2.2-2.3), dotyczyły pomiarów transonicznego przepływu pary wodnej w dyszy IWSEP. Podobne badania stanowiskowe dotyczyły modelu 5-łopatkowej płaskiej palisady statora oraz wirnika stopnia turbiny parowej LPT klasy ~200 MW. Przeprowadzone pomiary ilościowe i ich wizualizacja posłużyły dalej jako podstawa do weryfikacji metod i modeli użytych w technikach numerycznych modelowania przepływów WSF w dalszej części rozprawy. Ta część nie budzi istotnych uwag czy wątpliwości.

Wykonane przez doktorantkę i obliczenia numeryczne (Rozdział 3.2-3.4 i Rozdziały 4.3 – 4.5 i Rozdziały 5.1 – 5.3) oparto zarówno o referencyjne przykłady eksperymentu z badań własnych jak i cytowanej literatury (prace m.in. [1], [3], [9], [19], [31], [46]). W Rozdziale 3 omówiono problemy wynikające ze złożoności opisu procesów WSF oraz modyfikacji równań transportu i ich użycia w modelowaniu 3D przepływów pary. Dotyczy to opisu właściwości płynu (równania stanu IAPWS-97, Younga, NIST-Refprop 9.0), jak i założeń do schematów do technik RANS i DNS w pakietach Ansys CFX i Fluent (Rozdz. 3.2). Są one przedstawione w sposób czytelny i uzasadniają dalsze szczegółowe analizy i prezentowane przypadki symulacji. Można tu było więcej uwagi poświęcić dyskusji uzyskanych rezultatów graficznych analizy przepływu WSF przez dyszę IAPWS i palisady płaskie (str.59 – 71).

Przedstawione w Rozdziale 4 pracy techniki analizy przepływu w stopniu ekspansyjnym obejmują zarówno prosty model 1.5D oparty o uśrednione parametry pola przepływu i kinematykę prędkości jak i wprowadzają do opisu użytych następnie modeli CFD. Wyniki dotyczące analizy procesów nukleacji kropeł wody i ich wpływu na obrazowanie pola przepływu w palisadach wirnika i statora ostatniego stopnia turbiny LPT 200 MW pokazują istotne różnice i zmiany parametrów wzdłuż rozpiętości łopatek. Warto było tu jednak dodać kilka komentarzy na temat różnic modelu adiabatycznego i diabatyycznego przepływu oraz dystrybucji strat oraz wpływu kondensacji pary na nieodwracalne zjawiska termodynamiczne i przepływowe (Rys. 4.5 – 4.28).

Interesującym jest propozycja zawarta w końcowej części pracy (Rozdział 5). Dotyczy ona wstępnych analiz związanych z optymalnym doбором i modyfikacji geometrii łopatek statora i wirnika końcowych stopni turbin parowych LPT. Ilość przyjętych do analizy obliczeniowej CFD wariantów modyfikacji 2D/3D zarysu łopatek jest tu bardzo duża (profile 1-8, 4-8, zmiana liczby łopatek wirnika i statora i inne). Oryginalne wyniki symulacji

własnych podano w Rozdziale 5.2 i 5.3 (patrz, przypadki podane w Tablicy 5.1 5.2). Odniesiono je i porównano z referencyjnymi przykładami z prac Bakhtara [8] i White'a [9].

Rozdział 6 stanowi krótkie podsumowanie uzyskanych w pracy rezultatów. Podane tu wnioski dotyczą oceny poprawności modelowania procesów kondensacji oraz określania strat w przepływie przez kanały wewnętrzne dysz i wieńców ruchomych oraz nieruchomych końcowych stopni turbin parowych. Oszacowano tu wpływ nierównowagowej kondensacji oraz zjawisk falowych na lokalizację i natężenie stref zaburzeń na sprawność. Zaprezentowane tu wyniki są nowe i w kilku przypadkach w pełni oryginalne.

1.3. Wybór piśmiennictwa

Zamieszczona na końcu rozprawy literatura przedmiotu obejmuje 72 pozycje (w tym 71 anglojęzyczne). Wybrane materiały źródłowe są właściwie i merytorycznie związane z tematyką i programem badań doktorantki (dwufazowe przepływy wewnętrzne z kondensacją). Uzasadniają tym samym prezentowanie własnych rezultatów na tle aktualnych światowych dokonań innych autorów badań (w tym okres do i po 2000r.). Doktorantka zaznajomiła się i z rezultatami fundamentalnych prac dotyczących modeli opisu i badań przepływów 2-fazowych ze zmianą fazy (m.in. A. Kantrovitza [26], G. Gayarmathy'ego [33], W.G. Courtney'a [24] i J. Younga [5]), oraz umiejętnie wykorzystała ich praktyczne rezultaty.

Jako referencyjne dla potrzeb symulacji komputerowej w ANSYS CFD wybrano dobrze udokumentowane badania opisane m.in. w pracach Y. Bakhtara ([1],[3],[8],[27]) i A. White'a ([9],[13]), a także J. Younga [31], a także zespołów krajowych z IMP PAN ([55], [75]) oraz z Politechniki Śląskiej ([53],[54],[70]). Dobór i zakres źródeł piśmiennictwa został więc właściwie i poprawnie dokonany. Szereg prac źródłowych umiejętnie wykorzystano m.in. w trakcie prowadzonych badań własnych i testów eksperymentalnych, a także przy doborze oraz weryfikacji użytych modeli inżynierskich efektywnych narzędzi obliczeniowych.

1.4. Wskazanie celu i zakresu rozprawy

Przedstawiona do opinii praca dotyczy badań stanowiskowych oraz modelowania CFD przepływów wewnętrznych ośrodków ściśliwych w obszarze prędkości około-dźwiękowych z uwzględnieniem efektów dyspersyjnych wynikających z kondensacji pary wodnej. Poruszana tu problematyka jest aktualna i ma istotne znaczenie z punktu widzenia poznawczego i praktyki inżynierskiej. Motywacje dotyczące podjęcia się przez doktorantkę tej trudnej i złożonej problematyki wskazano w Rozdz. 1.2, co m.in. wynika z przeglądu literatury na temat stanu badań i zastosowania ich wyników w praktyce inżynierskiej. Główne cele i zakres pracy bezpośrednio w Rozdziale 1.3 (str. 21 i 22).

Zasadnicze cele tej pracy skupiły się na:

- doborze przykładów testowych i wykonaniu serii pomiarów w laboratorium badawczym KMiUE w celu weryfikacji poprawności modeli generacji i wzrostu kropli w przepływie pary z kondensacją,
- selekcji przydatności równań stanu gazu rzeczywistego (EOS) do opisu właściwości termodynamicznych pary wodnej w pobliżu linii nasycenia i linii Wilsona,
- implementacji modeli i wyników pomiarów przepływu do schematów numerycznych CFD w celu modelowania 3D przepływu w stopniu LPT turbiny 200 MW
- określeniu lokalnych struktur i stref kondensacji pary w 2D/3D przepływie na powierzchni łopatek i w kanałach międzyłopatkowych oraz w kanałach dysz Laval,
- identyfikacji obszarów o najwyższej generacji entropii i strat energii w wirniku i statorze stopnia turbiny parowej LPT,
- porównania wskaźników charakteryzujących pracę stopnia turbiny parowej LPT w warunkach przepływu adiabatycznego i diatermicznego (z obecnością kondensatu),

- wyborze geometrii łopatek i ich modyfikacji (optymalizacja geometrii profili wirnika i statora turbiny) oraz ocenie praktycznych skutków dla obniżenia strat i poprawy sprawności i osiągnięć stopnia turbiny LPT.

1.5. Ocena użytych metod badawczych

Użyte metody i narzędzia badawcze zostały starannie i poprawnie wybrane i umiejętnie wykorzystane przez doktorantkę. Dotyczy to badań stanowiskowych turbinowych palisad łopatkowych i dysz przepływowych w warunkach przepływu z kondensacją, a także jej symulacji komputerowej w stanach ograniczonej stabilności równowagi termodynamicznej. Dodatkowo przetestowano przydatność typowych pakietów CFD z użyciem równań i opisu parametrów mieszaniny pary mokrej oraz oceny strat w przepływie dla przypadków testowych (dysza IWSEP, płaska palisada turbinowa SUT, łopatki stopnia LPT turbiny 200 MW). Potwierdzono istotny wpływ wyboru modelu zjawisk i mechanizmu tworzenia kropli wilgoci na generowane straty entropii i spadek sprawności w układzie łopatkowym turbiny LPT. Zastosowano poprawnie aktualne techniki obliczeniowe CFD w tym pakiety ANSYS Fluent i CFX. Wybrano wielokrotnie sprawdzone modele opisu parametrów stanu czynnika, w tym opracowane efektywne kody obliczeniowe, które zapewniają wiarygodne rezultaty symulacji komputerowej. Wstępna analiza możliwości modyfikacji ułopatkowania wieńców statora i wirnika turbiny parowej wskazuje na nowe szanse ich doskonalenia przepływowego.

1.6. Omówienie wyników pracy

Wyniki pracy doktorskiej zostały syntetycznie zebrane w Rozdziale 6. Koncentrują się one wokół kwestii wyboru najbardziej efektywnych narzędzi w analizie obliczeniowej CFD w przypadku przepływów wewnętrznych pary wodnej w dyszach Laval'a oraz w wieńcach i układach łopatkowych końcowych stopni turbin kondensacyjnych.

W tym celu doktorantka wykonała szereg eksperymentów i pomiarów w laboratorium IMiUE, które stanowiły wiarygodną bazę danych do dalszych symulacji i testowania modeli obliczeniowych w technikach CFD Ansys CFX i FLUENT.

Spośród kilku modeli służących analizie quasi-równowagowych procesów wymiany i transportu masy, pędu oraz energii w przepływie pary wodnej z kondensacją wybrano dwa, tj. Fuchs-Satugina i Gyarmathy.

Przyjęta koncepcja adaptacji gęstości siatek obliczeniowych odpowiednio do strefy kanału przepływowego i obszaru obliczeniowego oraz właściwego modelu turbulencji ($k-\varepsilon$ i $k-\omega$) zostały tu dobrze potwierdzone w trakcie symulacji komputerowych. Nie podano tu tylko wymagań sprzętowych (PC, hardware) i czasu obliczeń iteracyjnych wybranych przypadków.

Ich zgodność z danymi z eksperymentów potwierdzają w szczególności 3, 4 i 6 dla testowych obliczeń zarówno dla przypadku przepływu w dyszy IWSEP jak i w płaskich palisadach turbinowych. Można było się tu pokusić (Rozdział 3.4), o bardziej wnikliwą interpretację przyczyny nieefektywności zastosowania modelu Yo-Yo (Case 2) do analizy przepływu z kondensacją w dyszy IWSEP, a także w palisadzie łopatkowej wirnika (Yo-IAPWS, Case 1,2 i 7). Dotyczy to głównie lokalizacji stref kondensacji i efektów falowych.

Wnioski które odnoszą się do roli zjawisk kondensacji na przepływ w ostatnich stopniach turbin parowych zawarte na str. 138-139 i poziom strat które generują są poprawne. Warto tu wskazać, że w tej branży inżynierskiej praktyki do szacowania strat ich sprawności stosuje się poprawkę Baumann'a (1912r.).

Wykazano potencjalne możliwości poprawy doskonałości rozwiązań konstrukcyjnych kształtowania wieńców łopatek w ujęciu 2D i 3D. Potwierdzono istotny wpływ konfiguracji, zarysu i zmiany pochylenia łopatek względem bieżni w kierunku obwodowym i osiowym (m.in. CL1 CL2 i ASCL), które znacząco poprawiają osiągi i obniżają straty w stopniu turbiny. Korzystny jest też wpływ tych zabiegów na sprawność i redukcję efektów depozycji

kropki kondensatu na łopatkach w stopniu turbiny LPT. Te wstępne analizy mogą być rozważane w dalszych badaniach i bardziej złożonych analizach numerycznych 3D z użyciem CFD i metod optymalizacji wielokryterialnej oraz narzędzi AI (sztucznej inteligencji).

1.7. Możliwości praktycznego zastosowania wyników badań

W badaniach naukowych i zastosowaniach inżynierskich, zarówno para wodna jak i gazy wilgotne są ważnym medium roboczym. Para w turbinach parowych niskiego ciśnienia (LPT) pracujących w elektrowniach ciepłych jest zazwyczaj rozprężana do próżni, a jej wylotowa część pracuje w warunkach pary mokrej. W elektrowniach geotermalnych i jądrowych prawie wszystkie stopnie turbiny pracują w parze mokrej, ponieważ temperatura pary świeżej na wlocie jest niższa niż w elektrowniach ciepłych. Obecność ośrodka dwufazowego na drodze przepływu prowadzi do szeregu negatywnych procesów spowodowanych mechanicznym i termodynamicznym oddziaływaniem cząstek cieczy z przepływem pary i powierzchniami kanałów między-łopatkowych. Ich skutkiem jest erozja łopatek co bezpośrednio wpływa na eksploatację i niezawodność turbiny.

Przedstawione w dysertacji wyniki badań, oprócz walorów poznawczych mają też potencjalne możliwości ich aplikacji praktycznych. Dotyczy to w szczególności:

- wyboru równania stanu dla pary wodnej w obszarze Wilsona w pakietach CFD,
- doboru gęstości siatki obliczeniowej dla CFD w przepływie 2-fazowym pary,
- wypracowania lepszych korelacji dla oceny strat wilgotnościowych w stopniu LPT
- optymalizacji geometrii łopatek 2D/3D w celu redukcji strat termodynamicznych i przepływowych, w tym poprawy osiągnięć ostatnich stopni turbin parowych LPT.

1.8. Dostrzeżone nieprawidłowości i błędy w pracy

W treści dysertacji wystąpiło także kilka niedociągnięć związanych z redakcją tekstu dysertacji oraz innych. W szczególności wymieniono tu kilka kwestii takich jak:

- Nie wprowadzono też do opisu działania stopnia turbiny (punkt 4.1.2) ważnych wskaźników dotyczących uproszczonego przepływu jak reakcyjność stopnia (udział wirnika w ekspansji gazu) czy bezwymiarowy wskaźnik wydatku (*flow coefficient*) i wskaźnik obciążenia (*load coefficient*). Ich zmiany w warunkach operacyjnych i kinematyce stopnia istotnie decydują o gradientach m.in. ciśnień i entalpii wzdłuż rozpiętości łopatek. Analiza równowagi promieniowej (*radial equilibrium*), pozwala świadomie ograniczać straty przepływowe związane z dyssypacją energii, w tym w przepływie z kondensacją oraz kompensować je dzięki modyfikacji 2D/3D geometrii i kinematyki prędkości w kanałach przepływowych stopnia.
- Symbolika opisu przepływu w stopniu turbiny osiowej nie zawsze jest konsekwentna w treści pracy. Dotyczy to używania różnych oznaczeń dla tych samych składowych prędkości w układzie współrzędnych walcowych $\{r, \theta, z\}$ w kilku rozdziałach pracy. Można przypuszczać, że jest to związane z prezentacją części wyników pracy w kilku wcześniejszych publikacjach.
- Prezentowane we Wprowadzeniu (Rozdział 1.1) podstawy fizyki przepływów pary mokrej w turbinach osiowych LPT oraz potrzeb ich doskonalenia można było bardziej ukierunkować na jej praktyczne cele inżynierskie (patrz, m.in. A. Weiss: *Aerodynamic design of advanced LP steam turbines*. ABB Review, 5/1998), co ma bezpośrednie odniesienie do użytecznych celów pracy.
- Na str. 36-47 brak komentarza dotyczącego porównania wyników pomiarów rozkładu ciśnień w dyszy IWSEP oraz na powierzchni palisady łopatek statora i wirnika turbiny z obrazowaniem ich techniką Schlieren odpowiednio do każdego przypadku. W szczególności dotyczy to zjawisk falowych w przepływie (Case 2) na Rys. 2.16 i 2.18, Rys. 2.21 i 2.22 oraz na Rys. 2.25 i 2.26. Cennym jest jednak samodzielne wykonanie

przez doktorantkę wielu testów w laboratorium KMIUE oraz ich potwierdzona przydatność w dalszej, obliczeniowej części pracy.

- Rozkład ciśnień wokół profili łopatek uzyskany w wyniku pomiarów w laboratorium SUT (str. 41 – 46), pokazany na Rys. 2.21 i Rys. 2.25 dla Case 1 i Case 2 jest niekompletny (punkty 1 -20 i 1- 15 powinny tworzyć kontur zamknięty).
- Zdaniem recenzenta, uproszczony opis aerodynamiki przepływu w stopniu turbiny, punkt 4.1.1 - 4.1.3 (str.72 – 81), lepiej byłoby połączyć w punkcie 1.1.2 (str. 9 – 11) dla zachowania jej zwartości tematycznej.
- Kinematyka prędkości na Rys.4.1 (str.74), odnosi się wyłącznie do warunku stałej prędkości obwodowej wirnika na wybranym promieniu r_m , gdzie $u = \omega \times r_m$. Długie łopatki ostatnich stopni turbin LPT w układzie wlot-wylot z wirnika często nie spełniają tego warunku (merydionalny przepływ stożkowy, Rys. 5.27).
- W Rozdziale 4.2 pracy (str.82 - 85), nie pokazano przekroju merydionalnego r - z oraz podstawowych wymiarów (wysokość łopatek) wieńca nieruchomego i wieńca wirnika modelowanego stopnia turbiny 13K215 (patrz, poz. [2] w CV doktorantki).
- Nie zdefiniowano poprawnie pełnego warunku zachowania rotalii (entalpia spiętrzenia w układzie względnym wirnika $h_{o,rel}$, (patrz wzór (4.7), str. 76). W przypadku dużej rozpiętości łopatek końcowych stopni turbin wzrost prędkości obwodowej $u = \omega \times r$, istotnie wpływa na rozkład parametrów i obciążenia stopnia.
- Brak jest oceny wyboru gęstości siatki obliczeniowej i przyjętych warunków zbieżności rozwiązania iteracyjnego dla symulacji w ANSYS CFX (Rozdział 4.4).
- Brak jest wskazania sposobu uśredniania absolutnej prędkości c i względnej w dla przepływu w stopniu (Rys. 5.4, 5.9, 5.15 i Rys. 5.20), tj. po przekroju czy po wydatku.
- Przy Rys.5.4 i 5.9 i 5.15, obrazujących zmiany prędkości c i w wzdłuż rozpiętości łopatek dobrze jest podać wartości uśrednionych liczb Macha, które im odpowiadają.

Inne drobne uwagi redakcyjne:

- W wykazie symboli i skrótów (str.6-8) brak kilku oznaczeń (m.in.: E – total specific internal energy, e – specific internal energy, H – specific total enthalpy, g - gravity acceleration, g – extinction coefficient, w – specific work, Q - heat, q - heat flux, Γ – mass generation rate; oraz skróty: NNLS INNLS, MUSCL, SST, TEOR, SUT,).
- Na str. 49, wzór (3.2) nie został uzupełniony o warunek mieszania $p = p_l = p_v$.
- Spis literatury (str.140 -145), nie ma chronologii alfabetycznej lub cytowań w treści pracy co zwykle ułatwia jej lekturę.
- Brak konsekwencji w zapisie skrótów tytułów czasopism (np. [10, [32], [36], [40]).
- Brak zdefiniowanej wielkości α we wzorze (3.2) str. 49 dla uśredniania gęstości mieszaniny ρ_m (porównaj, wzory (4.26), (4.27)).
- CV doktorantki można było zamieścić w tekście dysertacji, co zwykle robi się w tego typu opracowaniach.
- Do wzorów (4.12) – (4.14) nie ma komentarza na temat zasad przejścia z parametrów spiętrzenia na statyczne w obliczaniu sprawności układu łopatkowego stopnia turbiny.

1.9. Oryginalność pracy i jej walory

Recenzowana praca doktorska Pani Simi Shabani stanowi ważny i oryginalny przyczynek do badań w zakresie lepszego poznania złożonych mechanizmów i zjawisk jakie towarzyszą procesom termodynamiczno-przepływowym w stopniach i elementach maszyn wirnikowych. Nowe narzędzia badawcze i techniki pomiarowe umożliwiają obecnie bardziej szczegółową ocenę tych złożonych procesów i optymalizację rozwiązań w kierunku minimalizacji strat związanych z przepływem pary i jej kondensacją. Uwaga tych badań skupiona jest na jak

najlepszej estymacji generowania liczby, rozmiaru i koncentracji kropel kondensatu. Jednocześnie modele zjawisk związanych z kondensacją włączane są do uzupełnienia opisu równań Navier-Stokesa w technikach CFD.

Interesującym jest propozycja zawarta w końcowej części pracy (Rozdział 5). Dotyczy ona wstępnych analiz związanych z optymalnym doбором i modyfikacji geometrii łopatek statora i wirnika końcowych stopni turbin parowych LPT. Ilość przyjętych do analizy obliczeniowej CFD wariantów modyfikacji 2D/3D zarysu łopatek jest tu bardzo duża (profile 1-8, 4-8, zmiana liczby łopatek wirnika i statora i inne). Oryginalne wyniki symulacji własnych podano w Rozdziale 5.2 i 5.3 (patrz, przypadki podane w Tablicy 5.1 5.2). Odniesiono je i porównano z referencyjnymi przykładami z prac Bakhtara [8] i White'a [9]. Wykazano potencjalne możliwości dalszej poprawy doskonałości rozwiązań konstrukcyjnych w ujęciu 2D i 3D.

Potwierdzono istotny wpływ konfiguracji, zarysu i zmiany pochylenia łopatek względem bieżni w kierunku obwodowym i osiowym (m.in. CL1 CL2 i ASCL), poprawiają osiągi i obniżają straty w stopniu.

Korzystny jest też wpływ tych zabiegów na sprawność i redukcję efektów depozycji kropli kondensatu na łopatkach w stopniu turbiny LPT. Te wstępne analizy mogą być rozważane w dalszych badaniach i bardziej złożonych analizach numerycznych 3D z użyciem CFD i metod optymalizacji wielokryterialnej oraz AI (sztucznej inteligencji).

1.10 Ocena umiejętności i poziomu wiedzy doktorantki

Nowe narzędzia badawcze i techniki pomiarowe umożliwiają obecnie bardziej szczegółową ocenę tych złożonych procesów i optymalizację rozwiązań w kierunku minimalizacji strat związanych z przepływem pary i jej kondensacją. Uwaga tych badań skupiona jest na jak najlepszej estymacji generowania liczby, rozmiaru i koncentracji kropel kondensatu. Jednocześnie modele zjawisk związanych z kondensacją włączane są do uzupełnienia opisu równań Navier-Stokesa w technikach CFD.

Pani MScE Sima Shabani w trakcie odbytych kilku staży i studiów doktoranckich nabyła bogatą wiedzę i potwierdziła swoje umiejętności w zakresie samodzielnego prowadzenia badań i modelowania numerycznego złożonych zagadnień przepływów wewnętrznych w dyszach i kanałach turbin parowych. Dokumentują to m.in. ważne publikacje, których współautorem jest doktorantka (11 w publikacji periodykach o zasięgu międzynarodowym i 10 – materiały z konferencji) zamieszczonych w CV doktorantki.

Podsumowując należy zauważyć, że zarówno wiedza jak i poziom umiejętności doktorantki gwarantują jej zdolność do samodzielnego prowadzenia prac badawczych i rozwojowych w zakresie uprawianej dyscypliny i dobrze rokują na dalsze postępy naukowe.

2. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty stwierdzam, że opiniowana praca Pani mgr inż. Sima Sabani spełnia wymagania zawarte w przepisach ustawy o stopniach i tytułach naukowych („Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”, Dz. U. z dnia 30.08.2018r. poz. 1668) oraz wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Podpisał Jan Górski

Rzeszów, 9-09-2025r.