

Extended Abstract in Polish version

Title of thesis: Analiza kształtu profilu łopatkowego dla stopnia turbiny parowej o podwyższonej sprawności

Author:

Mgr inż. Sima Shabani

Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18
44-100 Gliwice
Poland

Supervisor:

Dr hab. inż., Mirosław Majkut , prof. PŚ

Silesian University of Technology
Faculty of Energy and Environmental Engineering
Department of Power Engineering and Turbomachinery
Konarskiego 18
44-100 Gliwice
Poland

Rozdział 1: Wprowadzenie

Turbiny parowe osiowe stanowią kluczowy element w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza w sektorach energetycznym, naftowym, gazowym oraz petrochemicznym, dzięki swojej wysokiej sprawności oraz niezawodności. Ich podstawową funkcją jest przekształcanie energii pary wodnej w energię mechaniczną, a ich zastosowanie obejmuje zarówno elektrownie opalane paliwami kopalnymi, jak i jednostki jądrowe oraz instalacje wykorzystujące odnawialne źródła energii. Szczególną uwagę należy poświęcić ostatnim stopniom niskociśnieniowych (LP) części turbin, gdyż to właśnie na tym etapie ekspansji pary dochodzi do kondensacji, której skutkiem jest powstanie pary mokrej — mieszaniny pary nasyconej oraz kropeł cieczy. Zjawisko to nie tylko wpływa negatywnie na sprawność energetyczną turbiny, lecz również prowadzi do problemów mechanicznych, takich jak erozja łopatek — spowodowana przez uderzenia dużych kropeł cieczy w elementy turbiny, co z czasem przyczynia się do ich degradacji i obniżenia wydajności całego układu.

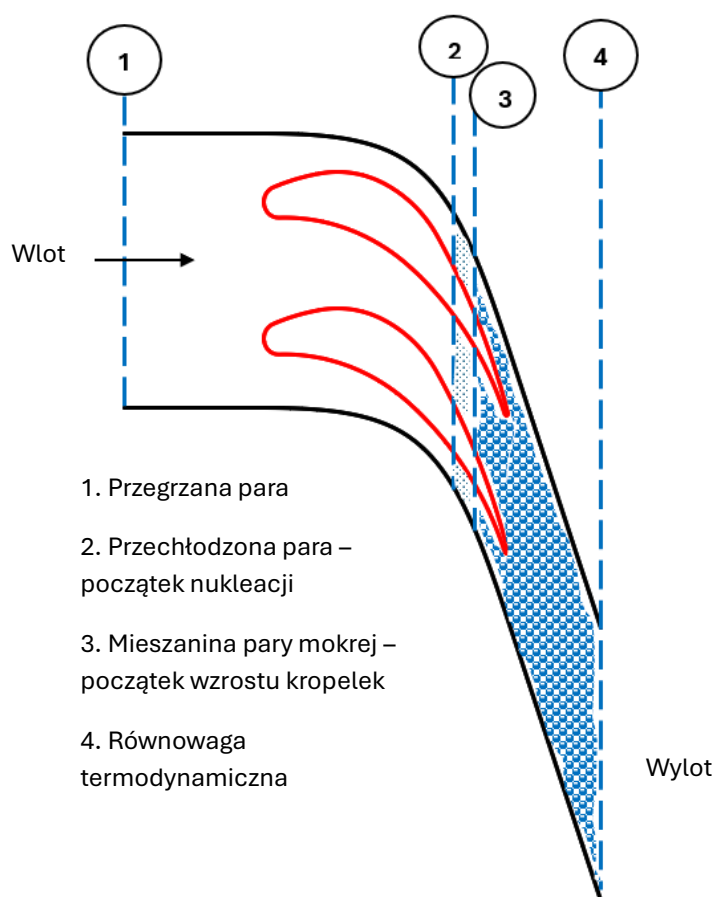
Rozprężanie pary związane z przejściem fazy przegrzanej do postaci pary mokrej, w kanałach łopatkowych turbiny, wiąże się ze złożonymi przemianami termodynamicznymi oraz zjawiskami aerodynamicznymi. Podczas przepływu przez kanały łopatkowe (rys. 1.1), para ulega rozprężeniu i ochłodzeniu, aż w końcu przekracza linię nasycenia, zapoczątkowując proces nukleacji oraz wzrostu kropeł cieczy. Kondensacja ta może zachodzić w sposób jednorodny, czyli bez udziału cząstek obcych. Dodatkowo, obecność fal uderzeniowych w przepływie jeszcze bardziej komplikuje dynamikę zachodzących procesów. Dokładne poznanie oraz realistyczne odwzorowanie tych zjawisk stanowi nieodzowny warunek optymalizacji konstrukcji turbin oraz zwiększenia ich sprawności eksploatacyjnej.

Inspiracją do podjęcia niniejszych badań była potrzeba zmierzenia się z wyzwaniem, jakim jest numeryczne modelowanie przepływu pary mokrej, a także konieczność walidacji takich modeli w oparciu o dane eksperymentalne. Poprzez analizę różnych modeli kondensacji oraz równań stanu, celem pracy jest wytypowanie najtrafniejszych podejść obliczeniowych do realistycznego symulowania procesu kondensacji pary. Szczególną uwagę skupiono na łopatkach kierowniczych ostatniego stopnia turbiny parowej o mocy 200 MW — miejscu, w którym dochodzi do znacznych strat energetycznych. Zastosowanie zaawansowanych metod obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) pozwala w tej pracy na pogłębioną analizę geometrii łopatek, a tym samym na sformułowanie zaleceń konstrukcyjnych mających na celu redukcję strat oraz poprawę ogólnej sprawności turbiny.

Główne cele niniejszej pracy obejmują:

1. weryfikację różnych modeli kondensacji w kontekście symulacji przepływu pary przez dysze Laval'a oraz kaskady liniowe,
2. potwierdzenie poprawności symulacji numerycznych poprzez ich porównanie z wynikami badań eksperymentalnych,
3. rozszerzenie analiz na trójwymiarową geometrię ostatniego stopnia turbiny,
4. zaproponowanie udoskonaleń konstrukcyjnych łopatek kierowniczych w oparciu o wyniki symulacji CFD, w celu minimalizacji strat energetycznych.

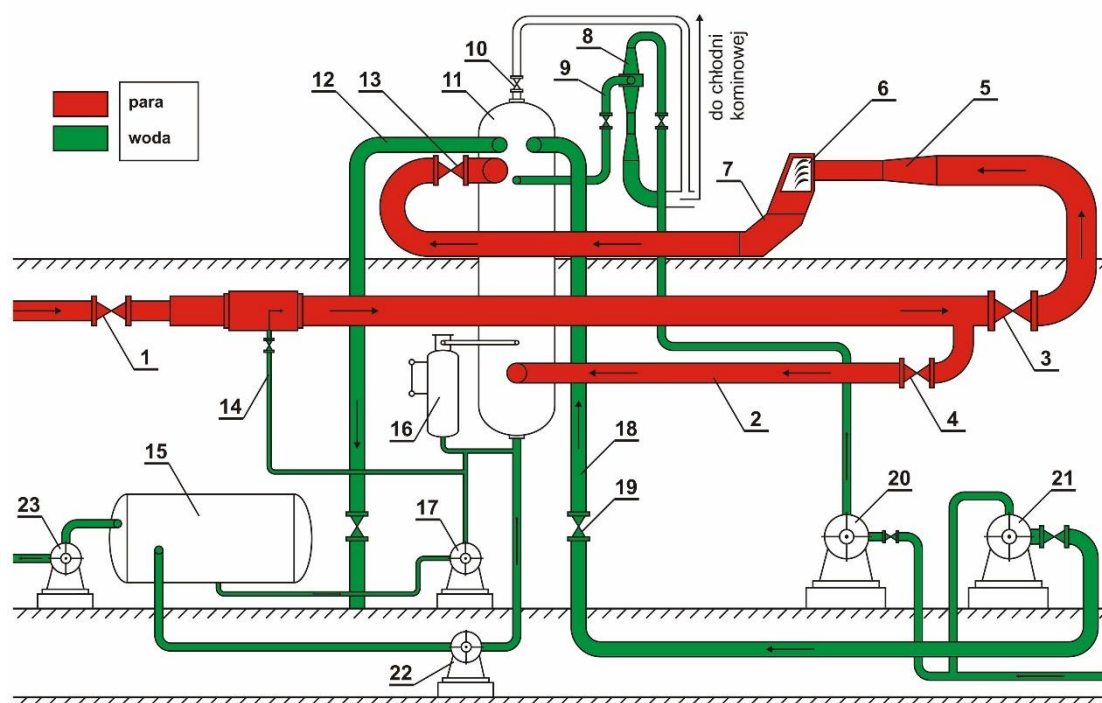
Ostatecznie, niniejsza praca stanowi próbę połączenia zaawansowanego modelowania numerycznego z praktycznymi zastosowaniami inżynierskimi, mając na celu zwiększenie efektywności oraz dalszego rozwoju konstrukcji i technologii turbin parowych.



Rys. 1.1 Proces rozprężania pary w łopatkach stopnia LP turbiny parowej

Rozdział 2: Badania eksperymentalne nad przepływem pary mokrej

Drugi rozdział niniejszej pracy przedstawia kompleksowe badania eksperymentalne zjawisk związanych z przepływem pary mokrej, przeprowadzone w wysokiej klasy stanowisku testowym. Eksperymenty zostały zrealizowane w tunelu parowym (rys. 2.1), znajdującym się w Hali Maszyn Ciepłych, Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechniki Śląskiej. Układ ten wykorzystuje przegrzaną parę wodną w celu odwzorowania warunków termodynamicznych i przepływowych charakterystycznych dla niskociśnieniowych (LP) stopni turbin parowych, co umożliwia precyzyjną kontrolę parametrów pary oraz prowadzenie szczegółowych pomiarów, istotnych z punktu widzenia rzeczywistych zastosowań przemysłowych.



1 – zawór regulacyjny; 2 – by-pass; 3 – zasuwa odcinająca na kanale pomiarowym; 4 – zasuwa odcinająca na by-passie; 5 – kanał wyrównawczy; 6 – komora pomiarowa; 7 – układ kierujący przepływ na wylocie; 8 – smoczek (strumienica wodna) do wytwarzania próżni w skraplaczu; 9 – rurociąg łączący smoczek ze skraplaczem; 10 – zawór bezpieczeństwa na skraplaczu; 11 – skraplacz; 12 – rurociąg ssawny układu chłodzenia skraplacza; 13 – przepustnica do regulacji przepływu pary; 14 – układ schładzania pary; 15 – zbiornik kondensatu; 16 – układ pomiarowy poziomego kondensatu; 17 – pompa układu schładzania pary; 18 – rurociąg tłoczny układu chłodzenia skraplacza; 19 – zawór odcinający; 20 – pompa do wody zasilającej smoczek; 21 – pompa układu chłodzenia skraplacza; 22, 23 – pompy kondensatu

Rys. 2.1. Stanowisko do badań przepływu pary w tunelu parowym

Głównym celem kampanii eksperymentalnej było scharakteryzowanie zachowania się pary mokrej w kontrolowanych warunkach oraz uzyskanie dokładnych zbiorów danych służących do walidacji modeli obliczeniowych. W eksperymentach zastosowano szereg technik pomiarowych, ze szczególnym uwzględnieniem metody ekstynkcji światła (LEM – Light Extinction Method), która została wykorzystana do określania rozkładu wielkości kropeł w przepływie pary mokrej. Dodatkowe techniki, takie jak pomiary ciśnienia statycznego oraz wizualizacja przepływu metodą Schlieren, dostarczyły cennych informacji na temat struktury przepływu oraz procesu kondensacji w geometriach reprezentujących elementy turbin.

Przed zastosowaniem systemu LEM w warunkach rzeczywistego przepływu przeprowadzono rozbudowaną procedurę kalibracyjną w celu zapewnienia jego dokładności i niezawodności. Kalibracja obejmowała:

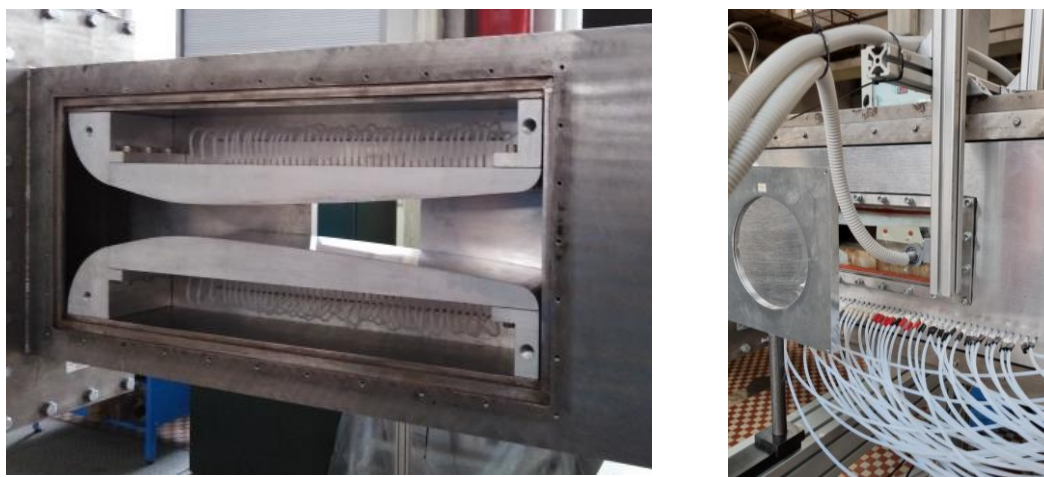
- testy kontrolne z udziałem cząstek o znanych średnicach w specjalnej komorze kalibracyjnej,
- walidację krzyżową z wykorzystaniem systemu dyfrakcji laserowej (Sprytec),
- porównanie różnych algorytmów obliczeniowych LEM na podstawie identycznych zestawów danych wejściowych,
- oraz pomiary porównawcze w rzeczywistych warunkach przepływu z użyciem zarówno metody LEM, jak i dyfrakcji laserowej.

Wyniki wykazały, że metoda LEM jest odpowiednim narzędziem do oceny wielkości kropeł w przepływach pary kondensującej, zapewniającym wystarczającą precyzję do pełnienia funkcji narzędzia walidacyjnego w modelowaniu numerycznym.

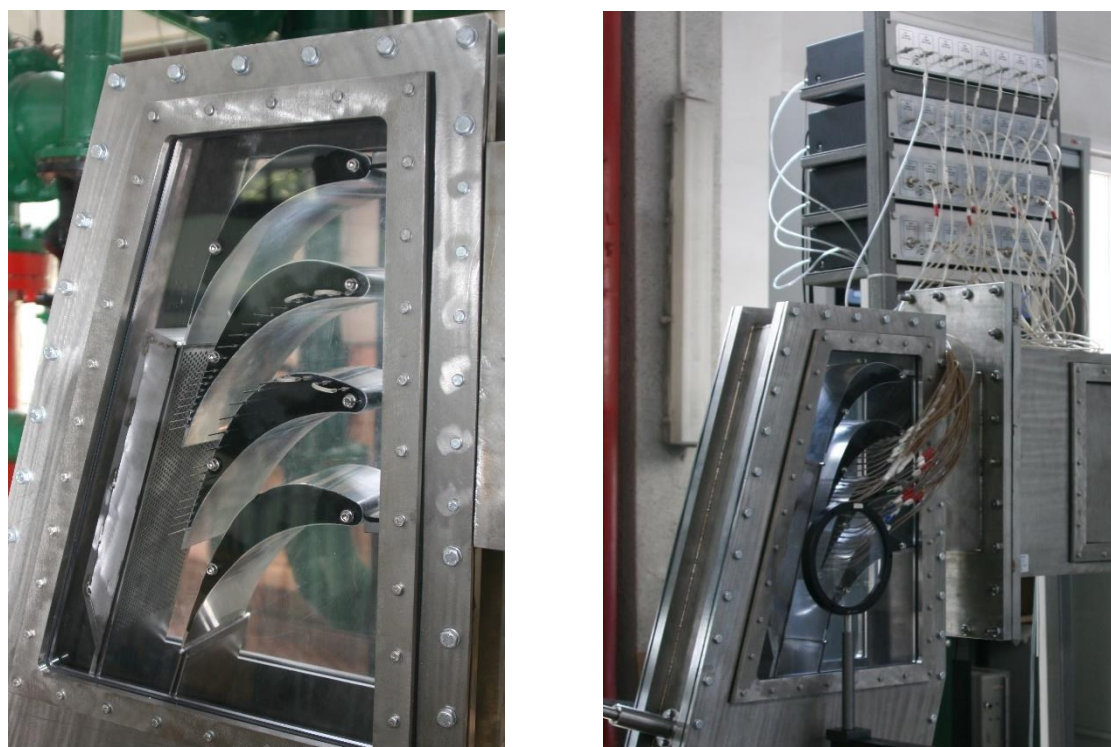
W celu uchwycenia szerokiego spektrum zachowań przepływu, badaniom poddano trzy różne geometrie: dyszę Lavalą (rys. 2.2), liniową kaskadę łopatek kierowniczych (rys. 2.3) oraz kaskadę wirnikową (rys. 2.4). Geometrie te zostały starannie dobrane tak, aby odzwierciedlać kluczowe komponenty rzeczywistej turbiny parowej, przy czym każda z nich charakteryzuje się unikalnymi właściwościami przepływowymi istotnymi dla walidacji modeli CFD. Wszystkie konfiguracje zostały wyposażone w gęstą siatkę punktów pomiaru ciśnienia oraz sondy LEM rozmieszczone strategicznie wzdłuż ścieżek przepływu, umożliwiając szczegółową analizę zmian ciśnienia i formowania się kropeł cieczy.

Uzyskane wyniki eksperymentalne stanowią kluczowy fundament dla symulacji omawianych w kolejnych rozdziałach pracy. Spójność oraz wysoka jakość pomiarów w

różnych konfiguracjach geometrycznych gwarantują, że zebrane dane mogą służyć jako wiarygodny punkt odniesienia w procesie walidacji modeli. Co więcej, elastyczność układu eksperymentalnego oraz jego zdolność do odwzorowywania rzeczywistych warunków pracy turbin podkreślają jego wartość nie tylko w kontekście niniejszego projektu badawczego, lecz również jako narzędzia wspierającego przyszłe analizy zjawisk pary mokrej w zastosowaniach turbomaszynowych.



Rys. 2.2. Widok dyszy IWSEP w sekcji testowej



Rys. 2.3. Kaskada łopatek kierownicy na stanowisku badawczym SUT oraz aparatura pomiarowa



Rys. 2.4. Kaskada łopatek wirnika na stanowisku badawczym SUT oraz aparatura pomiarowa

Rozdział 3: Poszukiwanie odpowiednich narzędzi symulacyjnych CFD

Niniejszy rozdział koncentruje się na ocenie i wyborze numerycznych narzędzi do symulacji przepływu pary mokrej, odpowiadając tym samym na jedno z kluczowych wyzwań w tej dziedzinie: braku uniwersalnie optymalnej metody obliczeniowej. Pomimo licznych wcześniejszych badań, rozbieżności w wynikach symulacji nadal pozostają powszechne — głównie z powodu różnic w modelowaniu kondensacji, strategiach implementacyjnych oraz charakterystykach solverów. Dlatego też wybór odpowiedniego narzędzia CFD i modelu kondensacji w zależności od wymagań konkretnego przypadku jest kluczowy dla dokładnego przewidywania i analizy.

Celem niniejszego rozdziału jest przetestowanie i porównanie różnych konfiguracji numerycznych z wykorzystaniem komercyjnych programów CFD — ANSYS Fluent oraz ANSYS CFX — poprzez ich zastosowanie do dwóch geometrii: dyszy zbieżno-rozbieżnej (IWSEP) oraz liniowej kaskady łopatek wirnika, przedstawionych wcześniej w rozdziale drugim. Geometrie te odzwierciedlają warunki charakterystyczne dla ostatnich stopni

niskociśnieniowych turbin parowych, gdzie powstawanie pary mokrej znacząco wpływa na wydajność i sprawność pracy turbiny.

W celu oceny skuteczności różnych strategii modelowania przygotowano siedem przypadków symulacyjnych (tabela 3.1), które różniły się głównie zastosowanym modelem kondensacji oraz równaniem stanu (EOS). Podzielono je na następujące grupy:

- Przypadki 1 i 2: wykorzystują wbudowany model pary mokrej w Fluent, z dwoma różnymi konfiguracjami równania stanu.
- Przypadki 3, 4 i 5: bazują na funkcjach użytkownika (UDF), opracowanych samodzielnie w środowisku Fluent, z różnymi modelami kondensacji.
- Przypadki 6 i 7: przeprowadzone w ANSYS CFX, również z zastosowaniem różnych modeli kondensacji.

Tabela 3.1. Przypadki rozważane w niniejszej pracy do modelowania przepływu pary mokrej

Case	Droplet growth model	Thermodynamic properties	Abbreviation
1	Young	Vukalovich EOS	Yo-Vu
2	Young	Young EOS	Yo-Yo
3	Gyarmathy	NIST real gas models	Gy-NIST
4	Fuch-Sutugin	NIST real gas models	FS-NIST
5	Young	NIST real gas models	Yo-NIST
6	Gyarmathy	IAPWS-IF97	Gy-IAPWS
7	Young	IAPWS-IF97	Yo-IAPWS

We wszystkich symulacjach zastosowano równania RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) wraz z modelem turbulencji $k-\omega$ SST. Przyjęto następujące założenia upraszczające:

- przepływ jest ustalony, ściśliwy, lepki i turbulentny,
- traktowany jest jako dwufazowy, z parą wodną jako fazą ciągłą i kroplami cieczy jako fazą rozproszoną,
- nie uwzględnia się względnej prędkości pomiędzy fazami z powodu dużej prędkości przepływu oraz małej objętościowej koncentracji kropli,

- wymiana ciepła z otoczeniem oraz oddziaływania między kroplami są pominięte,
- kondensacja przyjmowana jest jako jednorodna, a krople cieczy traktowane są jako kuliste, z zastosowaniem średniego promienia reprezentatywnego w modelach wzrostu.

Domeny obliczeniowe zostały zaprojektowane tak, aby jak najwierniej odwzorowywać warunki eksperymentalne. Dla dyszy IWSEP oraz kaskady wirnika opracowano odpowiednie siatki obliczeniowe, a warunki brzegowe dostosowano do tych, które obowiązywały w badaniach eksperymentalnych.

Celem analiz było porównanie rozkładów ciśnienia oraz zachowania kondensacji uzyskiwanych w każdym z przypadków symulacyjnych. Wyniki zostały porównane z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi na Politechnice Śląskiej w celu oceny dokładności modeli oraz ich zdolności predykcyjnych. Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące główne wnioski:

- Przypadki 3, 4 i 6 wykazały najlepszą zgodność z eksperymentalnymi rozkładami ciśnienia, co potwierdza ich przydatność do modelowania przepływu pary mokrej.
- Przypadki 1, 2 i 7 znacznie przeszacowały lub niedoszacowały wskaźniki wydajności, takie jak sprawność izentropowa, co oznacza, że konfiguracje te nie są wiarygodne dla dokładnych symulacji w warunkach pary mokrej.
- Modele wzrostu kropli Gyarmathy'ego oraz Fuchsa–Sutugina (zastosowane w przypadkach 3, 4 i 6) systematycznie dostarczały bardziej realistycznych i stabilnych wyników niż model Younga (wykorzystywany w przypadkach 1, 2, 5 i 7).

Na podstawie uzyskanych wyników zaleca się stosowanie przypadków 3 (Gy–NIST), 4 (FS–NIST) oraz 6 (Gy–IAPWS) w przyszłych symulacjach w ramach projektu. Zapewniają one najlepszy kompromis pomiędzy dokładnością a stabilnością, co czyni je odpowiednimi kandydatami do dalszego stosowania w modelowaniu zjawisk kondensacyjnych w turbinach parowych.

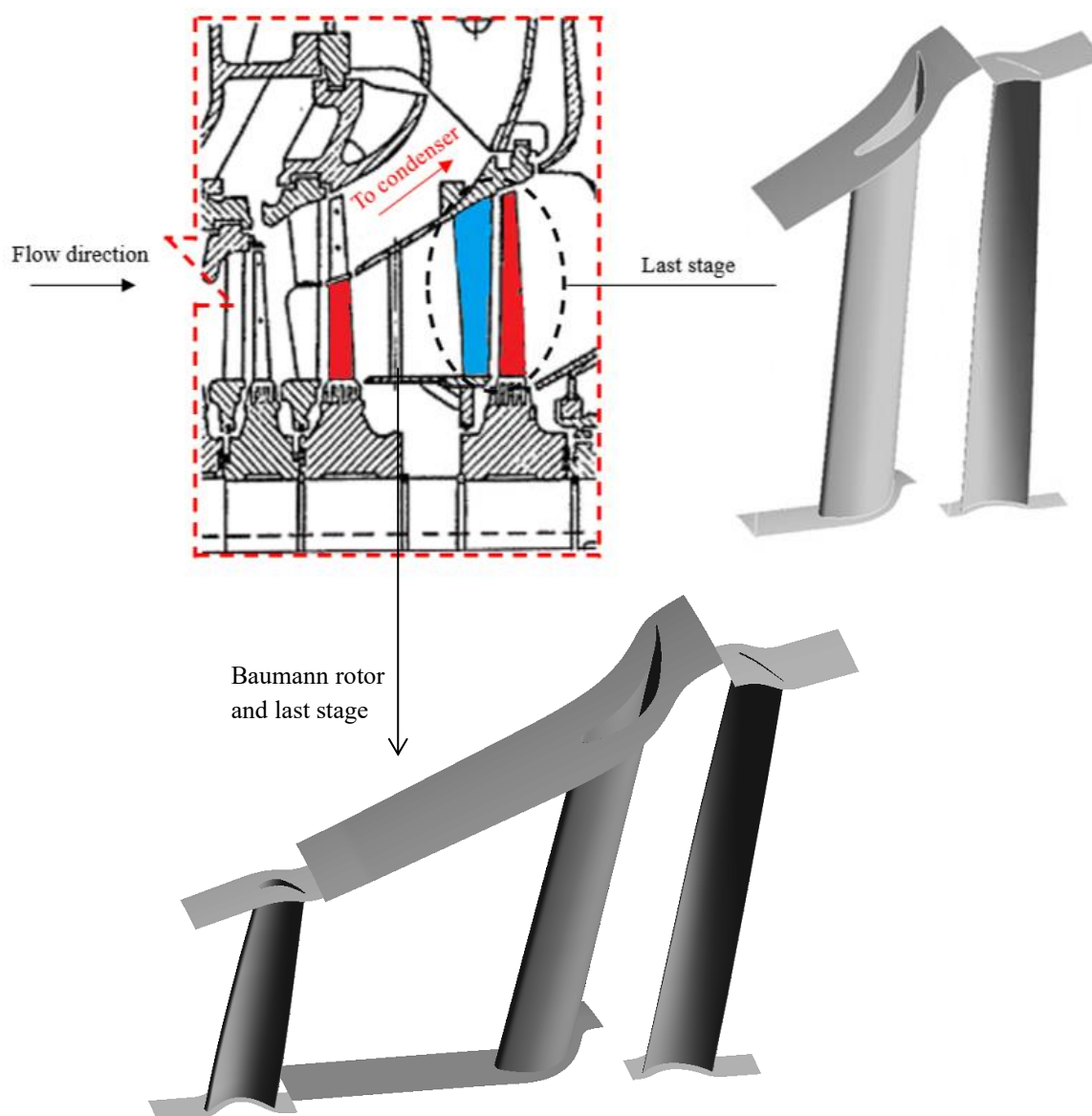
Rozdział 4: Trójwymiarowa symulacja przepływu pary mokrej w niskociśnieniowej kondensacyjnej turbinie parowej

Zrozumienie oraz precyzyjne modelowanie przepływu pary mokrej w turbinach parowych ma fundamentalne znaczenie ze względu na bezpośredni wpływ tych zjawisk na wydajność i

sprawność, szczególnie w stopniach LP, w których dochodzi do kondensacji. Obecność kropli cieczy przyczynia się do strat energetycznych, erozji łopatek oraz spadku mocy wyjściowej, co czyni to zjawisko kluczowym elementem w procesie projektowania i optymalizacji współczesnych turbin.

Pomimo istotności tego zagadnienia, dokładne modelowanie numeryczne przepływu pary mokrej w trójwymiarowych (3D) geometriach turbinowych pozostaje ograniczone, głównie ze względu na złożoność kanałów łopatkowych, silne niestacjonarności przepływu oraz trudności w odwzorowaniu skomplikowanych cech geometrycznych. Niniejszy rozdział odpowiada na te ograniczenia poprzez zastosowanie zweryfikowanych technik CFD do symulacji i analizy zachowania pary mokrej w rzeczywistej geometrii 3D, niskociśnieniowej turbiny parowej o mocy 200 MW. Celem symulacji jest nie tylko wierne odwzorowanie pola przepływu, ale również ilościowa ocena strat energetycznych i ich rozkładu w obrębie całego stopnia turbiny.

Strategia obliczeniowa oparta jest na zweryfikowanym przypadku 6 z rozdziału 3, zaimplementowanym w programie ANSYS CFX z wykorzystaniem modelu wzrostu kropli Gyarmathy'ego oraz równania stanu IAPWS. Konfiguracja ta została wybrana ze względu na potwierdzoną dokładność w przewidywaniu przepływów dwufazowych oraz kompatybilność z geometriami charakterystycznymi dla maszyn wirnikowych. Symulacja obejmuje rzeczywistą geometrię 3D (rys. 4.1) ostatniego stopnia LP turbiny, która została początkowo rozpatrywana oddzielnie, a następnie rozszerzona o wirnik typu Baumann. Zastosowanie podwójnej konfiguracji umożliwia ocenę zarówno lokalnych, jak i skumulowanych skutków kondensacji pary mokrej, przy maksymalnym odzwierciedleniu warunków rzeczywistych.



Rys. 4.1. Schemat niskociśnieniowej części turbiny parowej

Wyniki symulacji ujawniają szereg istotnych zjawisk związanych z kondensacją w przepływach LP turbiny:

- Już w samym ostatnim stopniu kondensacja rozpoczyna się w pobliżu krawędzi wylotowej kierownicy (w obszarze piasty) oraz po stronie ssącej wirnika (w pobliżu osłony). Obszary te korelują z najwyższym przyrostem entropii, co wskazuje na znaczące straty nieodwracalne. Produkcja entropii jest szczególnie intensywna w kierownicy, odpowiadając za około 10% strat całkowitych, podczas gdy w wirniku jedynie za 1%, co przekłada się na ogólną sprawność stopnia wynoszącą 89%.

- W porównaniu z przepływem adiabatycznym (bez kondensacji), zaobserwowano, że kondensacja powoduje:
 - przesunięcie fal uderzeniowych: w stronę wylotową w pobliżu piasty kierownicy oraz w stronę wlotową po stronie ssącej wirnika,
 - wzrost intensywności fal uderzeniowych na skutek gwałtownych zmian ciśnienia i temperatury podczas kondensacji,
 - obniżenie liczb Macha i lokalnych prędkości w strefach o dużej zawartości cieczy,
 - zmianę kątów wypływu, w szczególności zmniejszenie kąta wylotowego wirnika,
 - spadek ogólnej wydajności turbiny – obliczony spadek sprawności wynosi 1,27%, a redukcja mocy wyjściowej osiąga 15,04% w warunkach kondensacyjnych.
- W rozszerzonym modelu z wirnikiem Baumanna kondensacja objęła całą sekcję LP, prowadząc do wtórnej kondensacji przy krawędzi wylotowej kierownicy, co dodatkowo zwiększyło produkcję entropii oraz straty całkowite.

Ostatecznie, rozdział ten podkreśla kluczową rolę precyzyjnych, trójwymiarowych symulacji CFD w analizie przepływu pary mokrej w turbinach parowych. Możliwość modelowania oraz oceny strat wynikających z obecności pary mokrej stanowi solidną podstawę dla dalszego rozwoju konstrukcji łopatek, optymalizacji stopni turbiny oraz wdrażania strategii redukcji strat, które mogą przyczynić się do rzeczywistych usprawnień w pracy współczesnych systemów energetyki parowej.

Rozdział 5: Ocena wrażliwości wydajności stopnia na drobne zmiany geometrii łopatek kierownicy

Niniejszy rozdział poświęcony jest analizie wrażliwości wydajności ostatniego stopnia turbiny parowej na niewielkie modyfikacje geometryczne łopatek kierownicy. Na podstawie wcześniejszych ustaleń, które wskazywały kierownicę jako główne źródło strat energetycznych w stopniu, niniejsze badanie koncentruje się na ocenie wpływu lokalnych zmian konstrukcyjnych łopatek kierownicy na sprawność stopnia, straty energetyczne oraz moc

wyjściową — wszystko to w kontekście przepływu pary mokrej. Bazą odniesienia jest trójwymiarowa geometria ostatniego stopnia kondensacyjnej turbiny parowej o mocy 200 MW. Wysokiej rozdzielczości symulacje CFD pary mokrej, przeprowadzone z wykorzystaniem spójnych ustawień oraz modeli z poprzednich rozdziałów, posłużyły do analizy zarówno dwuwymiarowych (2D), jak i trójwymiarowych (3D) modyfikacji łopatek kierownicy.

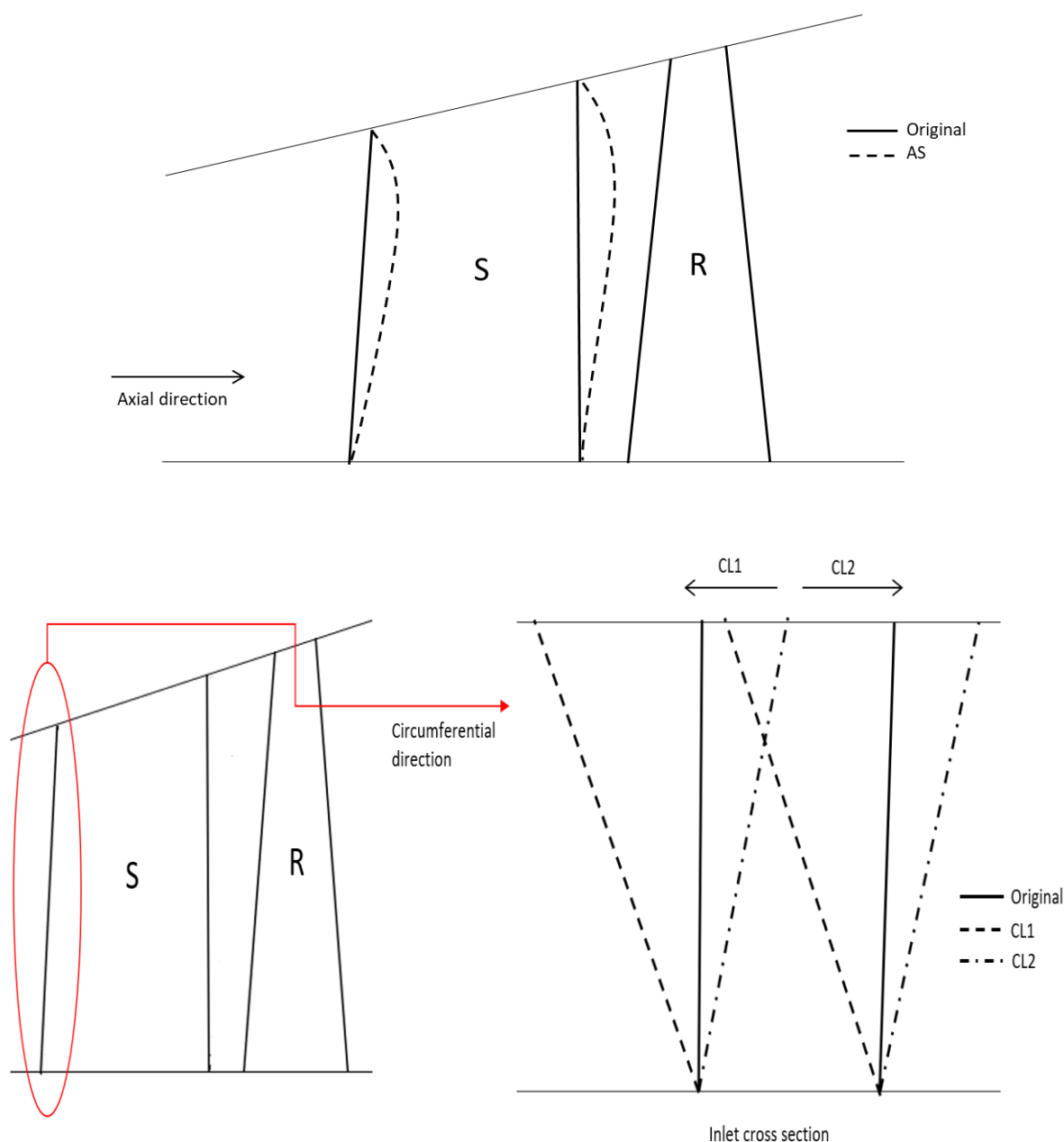
Wśród modyfikacji 2D analizowano m.in.:

- zmienność skrzywienia łopatki wzdłuż jej wysokości (konfiguracje st4–st8),
- zmianę liczby łopatek i ich rozstawu (st48 oraz st52),
- alternatywne profile łopatek (np. Bakhtar i White),
- modyfikacje kąta ustawienia łopatki ($\pm 2^\circ$).

Wyniki pokazują, że nawet niewielkie zmiany mają istotny wpływ na kluczowe parametry, takie jak rozkład prędkości, strumień masy, stopień suchości oraz moc wyjściową. Na przykład zmiana kąta ustawienia łopatki o zaledwie 2° (warianty st-2deg oraz st+2deg) prowadzi do znacząco odmiennych rezultatów. Wariant st-2deg poprawia sprawność stopnia i zwiększa moc wyjściową, choć jednocześnie powoduje wzrost wilgotności. Z kolei wariant st+2deg wpływa negatywnie na wszystkie analizowane wskaźniki. Zmiany rozstawu łopatek również wpływają na przepływ: mniejsza liczba łopatek (większy rozstaw) może zmniejszyć zatykanie przepływu i poprawić jego jednorodność, lecz jednocześnie zwiększa ryzyko oderwania strugi i strat. Istotny okazuje się również wybór profilu łopatki — profil Bakhtara konsekwentnie przewyższa konstrukcję referencyjną pod względem sprawności, choć wiąże się z nieco wyższym poziomem wilgotności.

W nowoczesnych konstrukcjach łopatek kierownicy często stosuje się cechy przestrzenne, takie jak odchylenie osiowe (axial sweep) i pochylenie obwodowe (circumferential lean), które nie występują w tradycyjnych projektach. Cztery zmodyfikowane konfiguracje zostały poddane analizie (rys. 5.1):

- Przypadek AS – odchylenie osiowe łopatki,
- Przypadek CL1 – pochylenie obwodowe w kierunku obrotu wirnika,
- Przypadek CL2 – pochylenie obwodowe przeciwnie do kierunku obrotu wirnika,
- Przypadek ASCL – kombinacja odchylenia osiowego i pochylenia obwodowego.



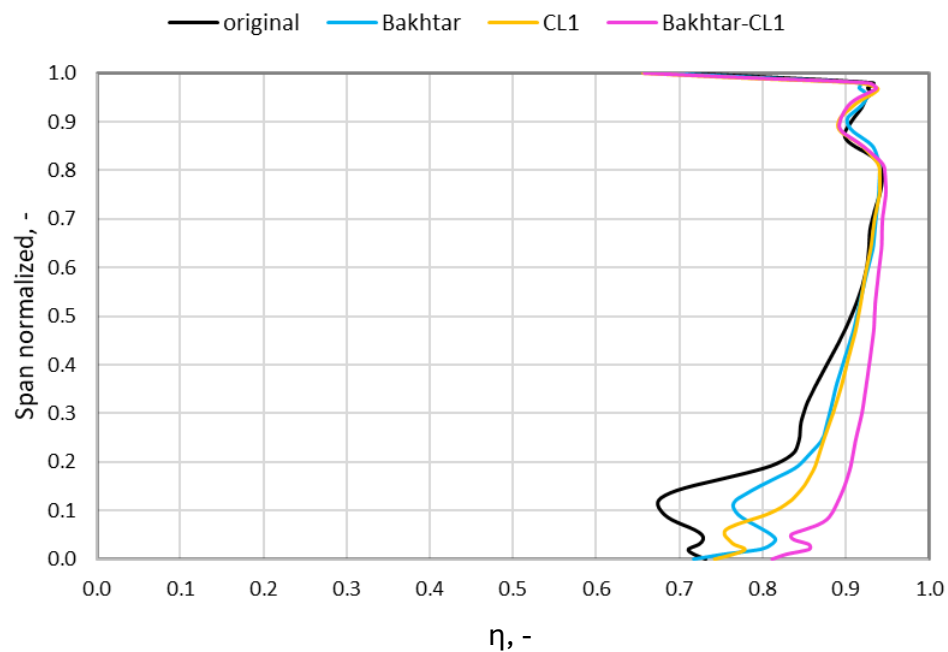
Rys. 5.1. Odchylenie osiowe (góra) i pochylenie obwodowe (dół) łopatki kierownicy

Wyniki pokazują, że najlepszą poprawę sprawności uzyskano dla konfiguracji CL1, gdzie pochylenie obwodowe zgodne z kierunkiem obrotu wirnika pozwala lepiej dopasować przepływ do wlotu wirnika, minimalizując straty wtórne. Z kolei konfiguracja CL2 skutkuje pogorszeniem wydajności.

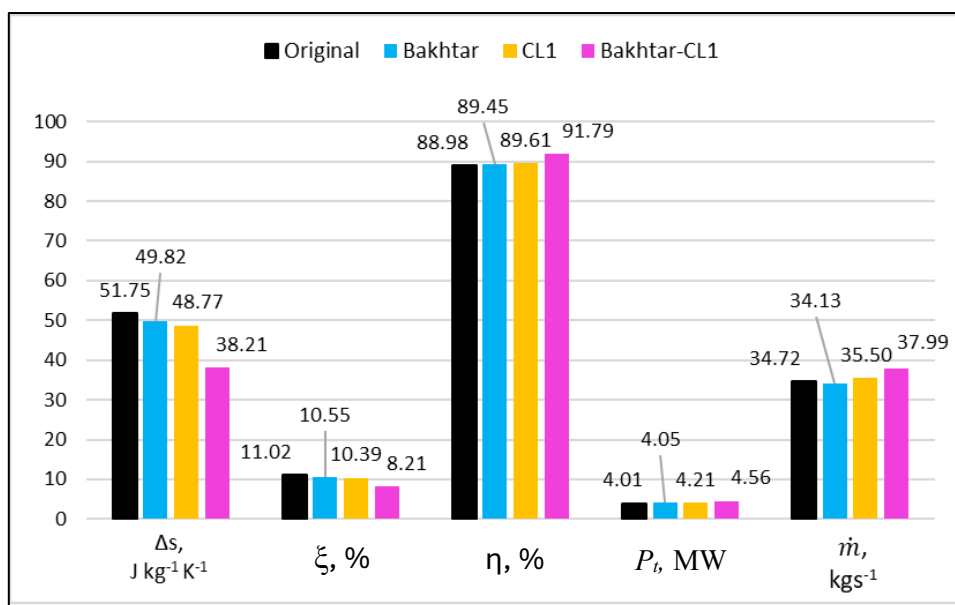
Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące kluczowe wnioski:

- Przepływ w pobliżu piasty jest bardziej wrażliwy na zmiany geometryczne ze względu na lokalne gradienty prędkości i ciśnienia — obszar ten powinien być szczególnie uwzględniany w działaniach optymalizacyjnych.

- Profil Bakhtara oraz konfiguracja z kątem ustawienia st-2deg przynoszą największe korzyści w zakresie sprawności.
- Spośród modyfikacji 3D, pochylenie obwodowe w kierunku obrotu wirnika (CL1) poprawia sprawność stopnia, natomiast pochylenie w przeciwnym kierunku (CL2) prowadzi do pogorszenia jego wydajności.
- Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano dla konfiguracji Bakhtar-CL1, łączącej profil Bakhtara z pochyleniem CL1, osiągając wzrost sprawności stopnia o 3,2% przy zachowaniu akceptowalnych wartości przepływu i wilgotności (rys. 5.2 i rys. 5.3).



Rys. 5.2. Rozkład sprawności stopnia wzdłuż wysokości łopatki dla analizowanych przypadków



Rys. 5.3. Średnie wartości generacji entropii, współczynnika strat entropowych, sprawności izentropowej, mocy wyjściowej oraz strumienia masy dla poszczególnych konfiguracji