

Streszczenie

Dyfuzja pędu oraz transfer energii kinetycznej stanowią kluczowe wyzwania w maszynach przepływowych, zwłaszcza w układach bezłopatkowych, takich jak turbina Tesli. Urządzenie to, charakteryzujące się przepływem promieniowym, wykazuje duży potencjał zastosowań w organicznych obiegach Rankine'a (ORC), układach skojarzonych wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (CHP), mikrogeneracji, odzysku ciepła odpadowego, konwersji energii geotermalnej oraz w małoskalowych systemach napędowych. Analiza przepływu w szczelinie pomiędzy wirującymi dyskami turbiny jest jednak wyjątkowo złożona ze względu na submilimetrowe skale geometryczne, zmienną geometrię przekroju poprzecznego, oddziaływanie sił bezwładnościowych związanych z ruchem obrotowym na turbulencję, wpływ konfiguracji dysz wlotowych oraz poruszające się ściany. Chropowatość powierzchni dodatkowo komplikuje strukturę pola przepływu. Główne parametry konstrukcyjne turbiny — takie jak układ zasilania i dysz, liczba oraz wymiary współwirujących dysków — wymagają optymalizacji w celu uzyskania maksymalnej sprawności.

Badania rozpoczęto od systematycznej analizy metod modelowania turbulencji i chropowatości w symulacjach przepływu przez wąskie szczeliny między wspólnie obracającymi się dyskami. Rozpatrzono dwa modele chropowatości: pierwszy, wprowadzający przesunięcie w dół bezwymiarowego profilu prędkości (modyfikacja funkcji ścianki), oraz drugi, modyfikujący parametry turbulencji przy ścianie zgodnie z metodą Aupoix. Modele te zweryfikowano na coraz bardziej złożonych geometriach — począwszy od przepływu nad chropowatą płytą płaską, poprzez przepływ w nieruchomych i obrotowych minikanalach. Model turbulencji $k - \omega$ Shear Stress Transport (*SST*) w połączeniu z korektą przyścienną Aupoix okazał się najbardziej wiarygodnym i dokładnym podejściem, szczególnie w domenach wymagających wysokiej rozdzielczości w obszarze przyściennym (niska wartość y^+). Badania parametryczne wykazały, że wysokość minikanalu, strumień masowy, rodzaj czynnika roboczego oraz wysokość chropowatości istotnie wpływają na profil prędkości i naprężenia styczne przy ścianie.

Kolejne etapy prac dotyczyły zjawisk przepływowych w turbinie Tesli. Analizie poddano dwie konfiguracje dysz zasilających: z sześcioma dyszami (N6) oraz z czterdziestoma dyszami (N40), w celu oceny ich wpływu na charakterystyki przepływu i sprawność turbiny. W celu ograniczenia kosztów obliczeń każdą konfigurację symulowano w domenie obejmującej reprezentatywny periodyczny sektor dyszy oraz periodyczny sektor szczeliny międzydyskowej. Dla przypadku N6 zastosowano symulacje typu Large Eddy Simulation (LES) z modelem podsiatkowym Smagorinsky'ego (SGS) i porównano wyniki z modelem $k - \omega$ *SST*. Model $k - \omega$ *SST* wykazał wystarczającą dokładność w analizach inżynierskich, mimo nieznacznej tendencji do przeszacowywania parametrów przepływu. Konfiguracja N40 charakteryzowała się zwiększonym strumieniem masowym i wyższą mocą generowaną, lecz także spadkiem sprawności wynikającym z nasilonych interakcji strumieni wlotowych oraz wzrostu poziomu turbulencji w rejonie krawędzi dysków.

Dalsze analizy objęły porównanie konfiguracji strumieni wlotowych typu „one-to-one” oraz „one-to-many”. Symulacje LES wykazały, że układ „one-to-one” powoduje większe fluktuacje przepływu i obniża sprawność w wyniku interakcji strumieni wlotowych z krawędziami dysków. Konfiguracja „one-to-one”, mimo oddziaływania turbulencji indukowanej przez ściany wirujące, zapewniała bardziej jednorodny transfer energii. Wyniki te podkreślają kluczową rolę geometrii dysz zasilających w ograniczaniu strat i poprawie sprawności turbiny.

Ponieważ bezpośrednio modelowanie rzeczywistej chropowatości powierzchni za pomocą równoważnego ziarna piasku okazało się niewystarczające z powodu braku uniwersalnej korelacji, wprowadzono podejście oparte na warstwie ośrodka porowatego (Porous Medium Layer, PML). Metoda PML wykorzystuje strefę porowatą na powierzchni dysku, o regulowanej porowatości i przepuszczalności, w celu odwzorowania oporu wywołanego chropowatością. Walidację modelu przeprowadzono na podstawie eksperymentów własnych dla przepływu wody w minikanale, dostosowując parametry PML w taki sposób, aby odtworzyć obserwowane spadki ciśnienia. Po zwalidowaniu modelu zastosowano go w układach z wirującymi dyskami i porównano jego skuteczność z modelem Aupoix, uwzględniając różne wysokości chropowatości.

W końcowym etapie badań przeprowadzono kompleksową analizę wpływu chropowatości powierzchni na przepływ w szczelinie pomiędzy współwirującymi dyskami turbiny Tesli z wykorzystaniem dwóch czynników roboczych o niskiej temperaturze wrzenia: R1234yf oraz n-heksanu. W tym celu zastosowano uprzednio zwalidowany model PML. Do zamknięcia układu równań przepływu wykorzystano model turbulencji $k - \omega SST$. Wyniki wykazały, że model PML poprawnie symuluje wpływ chropowatości powierzchni na strukturę przepływu, umożliwiając wierne odwzorowanie pracy turbiny Tesli w analizowanych przypadkach. Analiza porównawcza dwóch czynników roboczych — R1234yf i n-heksanu — potwierdziła, że model PML jest przydatny w symulacjach turbiny Tesli pracującej na gazach rzeczywistych oraz, że właściwości termofizyczne czynnika mają istotny wpływ na zjawiska przepływowe w procesie rozprężania.