

Prof. dr hab. Piotr Lampart
Instytut Maszyn Przepływowych
Polska Akademia Nauk w Gdańsku

Gdańsk, 24.11.2025

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha
zlecona przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny
Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
na Politechnice Śląskiej (pismo RIE-BD.512.40.2025)

1. Wprowadzenie

Rozprawa doktorska mgr inż. Mohammadsadegha Pahlavanzadeha zatytułowana „Assessment of the possibility of improving the momentum transfer in the flow between rotating discs [Ocena możliwości poprawy transferu pędu w przepływie pomiędzy wirującymi tarczami]”, przedłożona do recenzji, stanowi cykl 5 współautorskich publikacji monotematycznych, którym towarzyszy autoreferat. Została ona przygotowana pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Włodzimierza Wróblewskiego, oraz dr Krzysztofa Rusina jako promotora pomocniczego, na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej. Rozprawa zawiera: stronę tytułową, podziękowania, spis treści, oświadczenia autora dotyczące formatu pracy, wykaz publikacji stanowiących serię publikacji monotematycznych wraz z określeniem udziału autora jako współautora w pracy zespołowej, streszczenie rozprawy w języku angielskim i polskim, część dotyczącą nomenklatury, rozdział I – będący wprowadzeniem do tematu, rozdziały II – IV – omawiające serię publikacji monotematycznych I – V, rozdział V – będący dodatkowym opracowaniem kandydata, podsumowanie i wnioski, bibliografię oraz załączniki od I do V – stanowiące kopie artykułów od I do V należących do serii publikacji monotematycznych.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa koncentruje się na poprawie konwersji energii w przepływie pomiędzy obracającymi się tarczami, ze szczególnym uwzględnieniem przepływu w turbinach Tesli. W szczególności omówiono metody modelowania oraz oceniono wpływ chropowatości powierzchni i konfiguracji dyszy zasilającej na sprawność turbiny Tesli.

W rozdziale I, tytułem wstępu, autor przedstawia swoje motywacje i przegląd literatury dotyczącej turbin Tesli i ich zastosowania w systemach energii rozproszonej, zwłaszcza w kontekście odzyskiwania i wykorzystania ciepła odpadowego. Turbiny Tesli są interesującą i innowacyjną alternatywą dla tradycyjnych ekspanderów w systemach odzyskiwania ciepła odpadowego ze względu na ich prostą konstrukcję. Przepływ w turbinach Tesli jest uważany za stosunkowo złożony, ale nadal istnieje możliwość poprawy wydajności. Szczególnie duże nadzieje wiąże się ze zmianą chropowatości powierzchni, ponieważ konwersja energii w turbinach Tesli jest zdominowana przez siły lepkości. Dlatego jeden z podrozdziałów dotyczy metod modelowania chropowatości powierzchni w kodach CDF. Przegląd literatury ujawnia luki w badaniach, co pozwala kandydatowi określić główne cele pracy doktorskiej sformułowane jako znalezienie odpowiedzi na 10 pytań badawczych wymienionych na stronie 25 rozprawy. Na potrzeby niniejszego przeglądu można je podsumować następująco:

- znalezienie najbardziej odpowiedniego podejścia numerycznego do dokładnej symulacji przepływu pomiędzy współobracającymi się tarczami w turbinach Tesli, w tym modelowanie turbulencji i chropowatości powierzchni;
- określenie wpływu wielkości szczeliny między współobracającymi się tarczami i chropowatości powierzchni na charakterystykę przepływu i sprawność turbin Tesli;
- określenie wpływu liczby dysz i ich konfiguracji na aerodynamikę przepływu, wydajność i moc wyjściową turbin Tesli.

Rozdział II stanowi samodzielny raport przeglądowy

- artykułu I: Pahlavanzadeh, M., Rusin, K., Wróblewski, W., (2023), *Evaluation of dynamic correction of turbulence wall boundary conditions to simulate roughness effect in minichannel with rotating walls*, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, <https://doi.org/10.1108/HFF-03-2023-0160>, oraz
- artykułu II: Pahlavanzadeh, M., Rulik, K., Wróblewski, W., Rusin, K., (2024). *Application of roughness models to stationary and rotating minichannel flows*, International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, <https://doi.org/10.1108/HFF-05-2024-0379>.

Artykuły te analizują różne modele turbulencji do modelowania RANS (trzy modele turbulencji z dwoma równaniami, w tym transport naprężeń ścinających $k-\omega$ (ang. $k-\omega$ Shear Stress Transport, SST), $k-\epsilon$ ze standardową funkcją ścienną (ang. $k-\epsilon$ Standard Wall Function, SWF) oraz $k-\epsilon$ z rozszerzoną funkcją przyścienną (ang. $k-\epsilon$ Enhanced Wall Treatment, EWT)), oraz dwa podejścia do traktowania chropowatości (modyfikacje funkcji ściennej przy użyciu przesunięć profilu prędkości oraz metoda Aupoix, która dostosowuje wielkości turbulencji w pobliżu ściany, aby odzwierciedlić efekty chropowatości). Wszystkie te metody zastosowano w serii przypadków testowych, zaczynając od przepływu nad płaską płytą o zerowym gradiencie ciśnienia, a następnie rozszerzając je na stacjonarne i obrotowe minikanaly, takie jak w turbinach Tesli. Pozytywna weryfikacja skuteczności modelu turbulencji $k-\epsilon$ SST w połączeniu z metodą chropowatości Aupoixa została uznana za główne osiągnięcie tych badań. Potwierdzono również ilościowo, że zwiększenie chropowatości powierzchni oraz zmniejszenie rozmiaru szczeliny może prowadzić do zwiększenia wydajności przepływu (szczelina rozpatrywana tutaj jako przestrzeń między obracającymi się tarczami).

W rozdziale III autor dokonuje samodzielnego omówienia

- artykułu III: Pahlavanzadeh, M., Wróblewski, W., Rusin, K., (2024), *On the Flow in the Gap between Co-rotating Discs of Tesla Turbine with Different Supply Configurations: A Numerical Study*, *Energies*, <https://doi.org/10.3390/EN17174472>, oraz
- artykułu IV: Pahlavanzadeh, M., Wróblewski, W., Rusin, K., (2025), *Evaluation of nozzle configuration impact on flow structures and performance in Tesla turbine*, International Journal of Heat and Mass Transfer, <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASS-TRANSFER.2025.126900>.

Artykuły te poświęcone są porównaniu modelowania RANS i LES w obszarach turbiny Tesli. Model RANS jest uzupełniony o model turbulencji SST typu $k-\omega$. Model LES to WMLES, który można również sklasyfikować jako podejście hybrydowe RANS/LES, ponieważ integruje model SGS Smagorinsky'ego z modelem długości mieszania dla obszaru w pobliżu ściany. Modele te są stosowane do obliczeń turbin Tesli o różnych liczbach dysz, kątach i konfiguracjach (z zasilaniem jeden do jednego i jeden do wielu). Stwierdzono, że model WMLES jest bardziej wymagający obliczeniowo, jednak z większą dokładnością rejestruje przejściowe fluktuacje przy ścianach i w obszarach interakcji między końcówką dysku a strumieniem wlotowym. Mniej wymagający model

SST typu $k-\omega$ w porównaniu z modelem WMLES tylko nieznacznie zawyża naprężenie ścinające ściany i moment obrotowy (o $\sim 4,25\%$) i zapewnia wystarczająco dokładne przewidywania ogólnego zachowania przepływu.

[strona 3 z 6]

Stwierdzono również, że większa liczba dysz (40 dysz w konfiguracji jeden-do-jednego) zwiększa natężenie przepływu masy i moc wyjściową (nawet czterokrotnie w porównaniu z 6 dyszami), ale jednocześnie zmniejsza wydajność systemu (o $\sim 16\%$) z powodu złożonych interakcji strumieni. Dysze typu jeden-do-wielu są znacznie mniej wydajne pod względem generowanej mocy i wydajności przepływu niż dysze typu jeden-do-jednego ze względu na zwiększone interakcje między końcówką dysku a strumieniem wlotowym, co prowadzi również do zwiększonych interakcji pomiędzy strumieniem wlotowym a warstwą graniczną.

Rozdział IV stanowi autoreferat dotyczący

- artykułu V: Pahlavanzadeh, M., Rusin, K., Wróblewski, W., Rulik, S., (2025), *Roughness effects on flow in Tesla turbine with parametric adjustment of porous layer model*, Physics of Fluids. <https://doi.org/10.1063/5.0247548/3329214>.

Artykuł ten dotyczy symulacji wpływu chropowatości powierzchni w turbinie tarczowej przy pomocy modelu warstwy porowatej (PML), uzupełniającego model RANS (z modelem SST typu $k-\omega$). Warstwa porowata zmienia opór przepływu, dodając dodatkowy człon do równania pędu (zgodnie z równaniem Darcy'ego rozszerzonym przez Brinkmana-Forchheimera). Wszystkie równania opisujące ten przypadek, w tym równania turbulencji i lepkości, podlegają odpowiednim korektom ze względu na wartość porowatości. Uzyskane wyniki porównuje się z wynikami modelu Aupoix i weryfikuje za pomocą teorii i danych eksperymentalnych (dla chropowatej płaskiej płyty).

Zbadano trzy wartości chropowatości powierzchni turbiny Tesli i - dla wyższych wartości chropowatości - model PML wykazuje nieznacznie zwiększoną moc i sprawność turbiny w porównaniu z modelem Aupoix.

Rozdział V zawiera krótki opis dodatkowych badań autora dotyczących wpływu chropowatości powierzchni na przepływ w turbinie Tesli dwóch mediów o niskiej temperaturze wrzenia – R1234yf i n-heksanu. Wykorzystano przedstawiony wcześniej model warstwy medium porowatego. Obliczenia przeprowadzono w szerokim zakresie prędkości obrotowej, uzyskując pełną charakterystykę przepływu badanej turbiny tarczowej. Najlepszy punkt sprawności dla R1234yf znajduje się przy 5000 obr./min, natomiast dla n-heksanu przy 12 000 obr./min (dyski chropowate). Chropowatość powierzchni znacznie poprawia sprawność turbiny: dla R1234yf sprawność przepływu wzrosła z $\sim 18\%$ do $\sim 27\%$, dla n-heksanu sprawność wzrosła z $\sim 8\%$ do $\sim 15\%$.

Następnie sporządzono podsumowanie autoreferatu i wyciągnięto kilka wniosków. Chociaż LES zapewnia szczegółowy wgląd w struktury przepływu i zjawiska przejściowe, zwłaszcza w pobliżu końcówek tarcz, gdzie dominują fluktuacje przepływu, symulacje RANS z wykorzystaniem modelu SST typu $k-\omega$ nadal pozostają praktycznym narzędziem do badań parametrycznych ze względu na mniejsze wymagania dotyczące zasobów i akceptowaną dokładność. Model Aupoix i warstwa medium porowatego zapewniają rozsądną rozdzielczość efektów chropowatości powierzchni i stwierdzono, że wydajność przepływów w turbinach tarczowych można znacznie zwiększyć poprzez zastosowanie odpowiedniej wartości chropowatości powierzchni. Stwierdzono również, że odpowiednia liczba i rozmieszczenie dysz wlotowych (najlepiej jeden do jednego) ma kluczowe znaczenie dla wydajności turbin tarczowych.

[strona 4 z 6]

3. Ocena pracy doktorskiej

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi serię spójnych tematycznie publikacji, których współautorami są promotor i promotor pomocniczy. Raport z autoreferatu zawiera materiał informacyjny, podsumowujący załączoną serię publikacji. Autor rozwiązał nietrywialne zadanie badawcze charakteryzujące się wysokim stopniem złożoności, wykazując się tym samym umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych i stosowania odpowiednich metod badawczych. Wszystkie cele założone dla niniejszej pracy doktorskiej zostały osiągnięte. Cenne wyniki uzyskane w niniejszej pracy stanowią znaczący wkład w dyscyplinę inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki.

Za elementy rozprawy, które stanowią oryginalne i wyróżniające się osiągnięcia naukowe autora, uważam:

- przede wszystkim opracowanie narzędzi numerycznych do badania przepływów w turbinach tarczowych o dużej chropowatości powierzchni; kolejnym oryginalnym osiągnięciem jest analiza wpływu chropowatości powierzchni na charakterystykę przepływu i wydajność rozpatrywanych turbin tarczowych;
- kolejnym ważnym oryginalnym elementem pracy jest analiza wpływu konfiguracji dysz wlotowych na konwersję energii i wydajność przepływu badanych turbin tarczowych.

Większość autoreferatu jest napisana poprawnie pod względem treści, przy użyciu poprawnej angielszczyzny, zaawansowanej terminologii i z należytą precyzją sformułowań. Opis kluczowych kwestii jest zwięzły i poprawny. Przedstawione koncepcje są również odpowiednio zilustrowane. Istnieje jednak kilka wyjątków, które mogą budzić wątpliwości. Można również znaleźć kilka błędów lub nieodpowiednich sformułowań (ale nie jest ich wiele), niektóre z nich zostaną wskazane poniżej.

Tytuł i streszczenia:

- „...przenoszenie pędu...”, „Dyfuzja pędu oraz transfer energii kinetycznej...” – wyrażenia te są poprawne, zwłaszcza w kontekście badania wpływu chropowatości powierzchni na przepływy, gdzie efekty te są dominujące. Należy jednak również zauważyć, że turbiny Tesli pracujące na powietrzu lub w mediach ORC są nadal maszynami cieplnymi i mogą nie być turbinami o zerowej reakcji, co oznacza, że w obszarze wirnika nadal może występować pewien gradient ciśnienia i dalsza ekspansja w przestrzeni pomiędzy tarczami, czyli za dyszami. Manipulując konfiguracją dysz, można również spodziewać się zmiany reakcji turbiny. Zamiast więc mówić o „przenoszeniu pędu lub/i energii kinetycznej”, czasami bardziej właściwe może być mówienie o przenoszeniu energii w ogóle.
- Strona XI, wiersz 2 – „jeden-do-jednego” powinno brzmieć „jeden-do-wielu”, ponieważ pierwsze z tych sformułowań prowadzi do większych fluktuacji i strat przepływu.

Nomenklatura:

- Lista jest dość długa, ale niekompletna. Brakuje wielkości turbulencji, takich jak ϵ lub ω .
- Symbol τ (zwany naprężeniem stycznym) jest sprzeczny z $\tau_{i,j}$ jak w równaniach 11, 12 (powinno to być nazwane całkowitym naprężeniem ścinającym). Błąd ten powtarza się również w artykułach I-V.
- Specyficzna energia wewnętrzna powinna mieć jednostkę J/kg lub m²/s².
- Litery greckie można było uporządkować alfabetycznie.

Rozdział 1.3:

- Cele są zasadniczo w porządku, jednak można było je sformułować w bardziej zwięzły sposób.

Rozdział 2.2:

- Równania (10)-(14) są zasadniczo poprawne również dla RANS, jednak w równaniach tych $\tau_{i,j}$ jest całkowitym naprężeniem ścinającym, a nie „naprężeniem ścinającym ściany” (wiersz 1 poniżej równania 12) ani „naprężeniami turbulentnymi” (wiersz 4 poniżej równania 12). W tym przypadku całkowite naprężenie ścinające składa się z sumy naprężenia lepkiego i naprężenia turbulentnego. W tym przypadku strumień ciepła q obejmuje również strumień ciepła turbulentnego.
- Nie określono samej lepkości turbulentnej. Pożądane byłoby podanie wzoru na lepkość turbulentną μ_t wraz z równaniami (13)-(14). Ponadto, w jaki sposób obliczono turbulentny strumień ciepła?

Rozdziały 2.3-2.4:

- Brak informacji na temat tego, jakie medium przepływa przez chropowatą płytę i między tarczami. Informacji tej brakuje również w niektórych innych rozdziałach. O ile nie podano inaczej, czytelnicy powinni założyć, że przepływającym medium jest powietrze.

Rozdział 2.5:

- Strona 32, wiersz 9: „... spowoduje powstanie kilku komórek w kierunku typowym do ściany”. – zdanie nie jest zakończone.

Rozdział 3.3:

- Tabela 1. Czy mógłby Pan wyjaśnić różnicę w kącie strumienia wlotowego i ciśnieniu manometrycznym między konfiguracjami N6 i N40? Pomocne mogłoby być również podanie ciśnień na wlocie do dysz i na wylocie z przestrzeni pomiędzy tarczami. Jak zmienia się reakcja turbiny Tesli między konfiguracjami N6 i N40?

Rozdział 4.2:

- Jak zmienia się porowatość α w kierunku strumienia i poprzecznie do strumienia? W postaci równania algebraicznego?

Rozdział 4.4:

- Wiersz 7: Co oznacza sformułowanie „...bez drobnej siatki przyściennej...” w kontekście zastosowanego modelu turbulencji SST $k-\omega$?

Rozdział 5.4:

- Weryfikację wyników w wodzie można przenieść do rozdziału 4, ponieważ pojawia się ona również w artykule V.

Rozdział 5.5:

- strona 51, wiersz 5 od góry: „ORC jest procesem termodynamicznym...” – sformułowanie nie jest precyzyjne;
- Strona 52, wiersze 1-2 od dołu: „...główne pole przepływu jest utrzymywane na stałym poziomie...” – również nieprecyzyjne;
- Tabela 3: Pomocne byłoby podanie ciśnień na wlocie do dysz, na wlocie do przestrzeni pomiędzy tarczami oraz na wylocie.
- Strona 54, wiersz 1 od góry: „...adwekcja...” – również nieprecyzyjne;
- Strona 57, ostatni akapit od dołu: Co rozumie Pan/Pani przez „...blokada przepływu...” lub „...blokada przepływu powoduje zmniejszenie składowej stycznej i wzrost składowej

promieniowej prędkości...”? Czy ma Pan/Pani na myśli efekty przepływu naddźwiękowego i przepływ dławiony (rys. 14)?

[strona 6 z 6]

- Strona 58, drugi wiersz od góry: Gdzie obserwuje się przepływ wsteczny w przestrzeni między tarczami?
- Strona 59: Proszę wyjaśnić różnicę w rozkładzie prędkości dla różnych mediów.

Wybór cytatów jest odpowiedni do zakresu pracy. Drobny błąd – cytat 21 powtarza się jako 60.

4. Wnioski końcowe.

Rozprawa doktorska przedłożona do recenzji charakteryzuje się wysokim poziomem badań i stanowi oryginalne rozwiązanie zadania naukowego. Autor wykazał się rozległą wiedzą w dziedzinie modelowania przepływu w turbinach. Przedstawione wyniki rozprawy mają wartość użytkową, ponieważ autor pokazał, jak zwiększyć wydajność turbiny tarczowej. Nieliczne uwagi zawarte w niniejszej recenzji nie podważają mojej wysokiej oceny rozprawy. Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mohamaddsadegha Pahlavanzadeha spełnia wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

[podpis nieczytelny]

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem sporządzonym w języku angielskim.
Gliwice, dnia 10 grudnia 2025 r. Repertorium nr 535/2025.