



Silesian  
University  
of Technology

---

ROZSZERZONE STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

---

# Ocena możliwości poprawy transferu pędu w przepływie pomiędzy wirującymi tarczami

**Mohammadsadegh Pahlavanzadeh**

Promotor: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Wróblewski

Promotor pomocniczy: Dr inż. Krzysztof Rusin

Dyscyplina naukowa: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Gliwice, Poland, 2025

## Wykaz publikacji

Rozprawa doktorska składa się z pięciu artykułów, wymienionych poniżej i omawianych w Rozdziałach 2–4. Dodatkowo przeprowadzono modelowanie chropowatości z wykorzystaniem metody Porous Medium Layer (PML) dla turbiny Tesli pracującej z gazem rzeczywistym, a wyniki tego badania przedstawiono w Rozdziale 5. Pełne teksty tych artykułów zamieszczono w aneksach. W całej rozprawie artykuły te oznaczane są cyframi rzymskimi.

Paper 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>.

Paper 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>.

Paper III: **Pahlavanzadeh, M.**, Wróblewski, W., Rusin, K., (2024). On the Flow in the Gap between Co-rotating Disks of Tesla Turbine with Different Supply Configurations: A Numerical Study. Energies. <https://doi.org/10.3390/EN17174472>.

Paper 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.IJHEATMASSTRANSFER.2025.126900>.

Paper 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>.

# Rozdział 1: Wprowadzenie

Turbina Tesli jest bezłopatkową maszyną przepływową, której działanie opiera się na siłach lepkościowych, a nie na przekazywaniu pędu za pomocą łopatek. Jej sprawność determinowana jest przez konstrukcję, warunki pracy oraz wzajemne oddziaływania poszczególnych elementów. Składa się z trzech głównych części – układu zasilania, wirnika i systemu wylotowego – i wymaga wąskich szczelin między tarczami oraz małych różnic prędkości w celu utrzymania przepływu laminarnego. Ogranicza to jednak strumień masowy, gradienty prędkości oraz generowaną moc całkowitą. Dodanie wielu tarcz lub zastosowanie modyfikacji powierzchni, takich jak mikronacięcia, może poprawić dyfuzję pędu, lecz jednocześnie zwiększa złożoność konstrukcji lub zaburza przepływ laminarny. Głównym ograniczeniem turbiny Tesli jest niska sprawność, wynikająca przede wszystkim z konstrukcji układu zasilania, gdzie małe dysze i efekty warstwy przyściennej powodują znaczne straty lepkościowe, dodatkowo potęgowane przez zakłócenia przepływu na krawędziach tarcz wirnika. W celu kompleksowej oceny osiągnięć i możliwości optymalizacji turbiny Tesli stosowane są zarówno badania eksperymentalne, jak i analizy numeryczne.

Badania eksperymentalne nad turbiną Tesli odegrały kluczową rolę w ocenie jej rzeczywistych parametrów pracy, w weryfikacji modeli analitycznych oraz zrozumieniu wpływu konstrukcji i warunków eksploatacji. Wczesne eksperymenty koncentrowały się na ocenie sprawności i charakterystyk mechanicznych przy różnych warunkach pracy, analizując m.in. odstęp między tarczami, liczbę tarcz, ciśnienie wlotowe, geometrię dysz i rodzaj czynnika roboczego. Dzięki prostej budowie turbinę badano także pod kątem zastosowań w mikrosystemach energetycznych, odzysku ciepła odpadowego czy wytwarzaniu energii w niskich temperaturach. Nowsze eksperymenty skupiają się na poprawie osiągnięć poprzez innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne, optymalizację rozkładu przepływu oraz modyfikacje takie jak chropowatość powierzchni, urządzenia sterujące przepływem czy zaawansowane konfiguracje dysz. Udoskonalone techniki pomiarowe umożliwiły precyzyjniejsze określanie kluczowych parametrów przepływu, zapewniając lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących wewnątrz maszyny.

Badania numeryczne nad turbiną Tesli stanowią podstawę do analizy złożonego przepływu lepkiego i efektów warstwy przyściennej, które różnią się od tych z klasycznej aerodynamiki łopatek. Podczas gdy pierwsze prace opierały się na modelach analitycznych, rozwój numerycznej mechaniki płynów (ang. CFD) pozwolił na szczegółowe symulacje turbulentnego przepływu pomiędzy obracającymi się tarczami. Dzięki temu możliwe jest prognozowanie osiągnięć, identyfikacja mechanizmów strat i optymalizacja geometrii przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów badań eksperymentalnych. Głównym wyzwaniem pozostaje modelowanie doprowadzenia czynnika roboczego przez dysze, gdzie interakcje strugi z warstwą przyścienną w pobliżu powierzchni tarcz generują silnie nieustalony i złożony przepływ, wymagający szczegółowej analizy.

Chropowatość powierzchni ma istotny wpływ na pracę turbiny Tesli, ponieważ w przepływie pomiędzy wirującymi tarczami dominują siły lepkościowe, a sprawność silnie zależy od naprężeń stycznych ścian i przenoszenia pędu w strefie przyściennej. Istniejące metody modelowania chropowatości nie są jednak dobrze dostosowane do specyficznych warunków przepływowych turbiny, w których niewielkie odstępstwa między tarczami, nakładające się warstwy przyścienne, siły bezwładności związane z ruchem obrotowym oraz krzywizna linii prądu komplikują prognozowanie turbulencji. Powoduje to często rozbieżności między wynikami symulacji numerycznych a danymi eksperymentalnymi, ponieważ wierne odwzorowanie tak małych domen wymaga bardzo gęstych siatek obliczeniowych i wysokich nakładów obliczeniowych.

Wśród modeli turbulencji najlepiej sprawdza się w tych warunkach model  $k - \omega$  Shear Stress Transport ( $k - \omega SST$ ). Najnowsze badania podkreślają, że chropowatość tarcz wirnika stanowi kluczowy parametr poprawy sprawności i mocy wyjściowej, co wskazuje na konieczność szczegółowej analizy zjawisk przepływowych między wirującymi tarczami.

## Zakres pracy doktorskiej

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena możliwości poprawy transferu pędu w przepływie pomiędzy wirującymi tarczami, ze szczególnym uwzględnieniem turbin Tesli. W badaniach analizowany jest wpływ chropowatości tarcz, konstrukcji dysz oraz konfiguracji układu zasilania na sprawność turbiny.

Rozprawa ma na celu udzielenie odpowiedzi na następujące główne pytania badawcze, zrealizowane w ramach trzystopniowego podejścia, przedstawionego w rozdziałach 2–5:

- Jaka metoda numeryczna zapewnia najdokładniejszą symulację przepływu pomiędzy wirującymi tarczami o szczelinie porównywalnej z tą stosowaną w turbinie Tesli, z uwzględnieniem modeli turbulencji, jakości siatki obliczeniowej i implementacji chropowatości?
- W jaki sposób chropowatość powierzchni wpływa na naprężenia styczne ścian oraz charakterystyki przepływu w kanale i w szczelinie między wirującymi tarczami?
- Jak struga z dyszy oddziałuje na przepływ pomiędzy wirującymi tarczami w porównaniu z przepływem o jednorodnym rozkładzie prędkości na wlocie?
- W jaki sposób liczba dysz oraz ich konfiguracja wpływają na aerodynamikę przepływu, sprawność oraz moc wyjściową turbiny Tesli?
- Jakie są różnice pomiędzy modelem turbulencji  $k - \omega SST$  a metodą Large Eddy Simulation (LES) w przewidywaniu struktur przepływu wewnętrznego i osiągow turbin Tesli?
- Jak dokładniej odwzorować wpływ rzeczywistej chropowatości powierzchni w symulacjach CFD, w szczególności w kontekście modelowania turbiny Tesli?
- W jaki sposób chropowatość powierzchni wpływa na osiągi turbiny Tesli pracującej z wybranymi czynnikami Organic Rankine Cycle (ORC)?

## Rozdział 2: Badanie charakterystyk przepływu w mikrokanalach z nieruchomymi i obracającymi się ścianami – Papers I and II

### Zakres badań

Niniejszy rozdział (Papers I and II) podejmuje problem modelowania wpływu chropowatości powierzchni na przepływ w wąskich kanałach, a w szczególności w submilimetrycznych szczelinach pomiędzy wirującymi tarczami turbiny Tesli, gdzie oddziaływania warstw przyściennych wynikające z geometrii silnie kształtują turbulencję i transfer pędu. W celu uchwycenia tych złożonych zjawisk przeprowadzono ocenę modeli turbulencji oraz dwóch strategii modelowania chropowatości: przesunięcia profilu prędkości

w funkcjach ściany oraz metody Aupoix, która modyfikuje wielkości turbulentne w strefie przyściennej. Ich dokładność i ograniczenia zweryfikowano na przykładzie chropowatych płyt płaskich, stacjonarnych i obrotowych minikanalów oraz szczelin zbliżonych do geometrii tarcz turbiny Tesli. Walidację przeprowadzono w oparciu o dane uzyskane z Direct Numerical Simulation (DNS), eksperymenty dostępne w literaturze oraz pomiary własne. Analiza koncentrowała się na kluczowych parametrach, takich jak wielkość szczeliny, wysokość i kształt chropowatości, przejście laminarno–turbulentne, naprężenia styczne na ścianie, lepkość turbulentna oraz wpływ obrotu tarcz na oddziaływania warstw przyściennych. Uzyskane wyniki dostarczają uproszczonego, lecz reprezentatywnego opisu zachowania przepływu pomiędzy wirującymi tarczami turbiny Tesli.

## Przepływ między wirującymi się tarczami

Badania wstępne dotyczące prostszych geometrii, przedstawione w artykułach I i II, wskazują, że przy zmniejszeniu skali domeny i przekroju przepływu wygenerowanie odpowiedniej siatki dla modelu turbulencji  $k - \varepsilon$ , z pierwszą warstwą zlokalizowaną w obszarze obowiązywania rozkładu logarytmicznego, skutkuje możliwością zastosowania jedynie kilku komórek w kierunku normalnym do ściany, co jest rozwiązaniem niewłaściwym. Model  $k - \omega$  SST, wykorzystujący gęstszą siatkę w obszarach intensywnych zmian lepkości wirowej oraz rzadszą w bardziej oddalonych rejonach, sprawdza się lepiej dzięki możliwości płynnego przejścia pomiędzy modelem  $k - \omega$  a modelem  $k - \varepsilon$ . Badania wykazują ponadto, że wprowadzanie chropowatości wg metody Aupoix sztucznie modyfikuje lepkość turbulentną na ścianie na podstawie parametrów chropowatości, eliminując konieczność odwzorowania chropowatości w pierwszej warstwie siatki. Zastosowanie tej metody w połączeniu z modelem  $k - \omega$  SST daje dobre rezultaty zarówno w minikanalach stacjonarnych, jak i obrotowych.

Przepływ w szczelinie pomiędzy dwiema wirującymi tarczami stanowi fundamentalną konfigurację, szeroko analizowaną w celu zrozumienia struktur przepływu i oddziaływań tarcza–przepływ, które są kluczowe dla osiągnięcia optymalnej sprawności turbiny Tesli. Wielkość szczeliny, prędkość obrotowa oraz chropowatość odgrywają zasadniczą rolę w kształtowaniu struktury przepływu i warstwy przyściennej pomiędzy tarczami, co szczegółowo omówiono w artykułach I i II. W przypadku przepływu przez wąską szczelinę między wirującymi tarczami profil prędkości zależy od interakcji rozwijających się warstw przyściennych obu równoległych tarcz. Wysokość chropowatości, jako kluczowy parametr rozwoju warstwy przyściennej, prowadzi do przesunięcia profilu prędkości ku dołowi. Przepływ między współwirującymi tarczami kształtowany jest przez interakcję warstw przyściennych obu równoległych powierzchni tarcz, co uniemożliwia pełny rozwój profilu prędkości. Tłumaczy to obserwowane rozbieżności pomiędzy wynikami dla gładkich ścian a przewidywaniami opartymi na teorii laminarnej i rozkładzie prędkości zgodnym z teoretycznym rozkładem logarytmicznym. Kluczowe parametry wpływające na generację mocy i charakterystykę przepływu pomiędzy tarczami z jednorodnym przepływem wlotowym omówiono w artykułach I i II.

## Osiągnięcia

Skuteczność modelu turbulencji  $k - \omega$  SST w połączeniu z metodą chropowatości Aupoixa została zweryfikowana na minikanale, a następnie zastosowana do symulacji przepływu pomiędzy współwirującymi dyskami. Pomimo znanych ograniczeń metody Aupoixa, podejście to wykazało wiarygodną skuteczność we wszystkich analizowanych przypadkach. Umożliwiło ono optymalizację

kosztów obliczeniowych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej dokładności, nawet w wymagających obszarach przyściennych, bez konieczności stosowania bardzo gęstej siatki obliczeniowej.

Badania nad minikanalami wykazały, że elementy chropowatości zawężają przekrój przepływu, co prowadzi do rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a przewidywaniami teoretycznymi. Zmniejszenie szczeliny z 15 mm do 0.75 mm uwidoczniło silniejsze oddziaływanie rozwijających się warstw przyściennych pomiędzy wirującymi tarczami oraz większą rozbieżność pomiędzy obserwowanym profilem prędkości a estymacjami teoretycznymi. Zmiana prędkości obrotowej wpływa na generację mocy, przy czym maksymalną wartość 7 W odnotowano dla szczeliny o szerokości 0.75 mm i wysokości chropowatości równej 3.5% tej szczeliny. Wzrost wysokości chropowatości w badanym przypadku (szczelina 0.75 mm) spowodował poprawę sprawności z 30% do 36%, przy uwzględnieniu czterech wysokości chropowatości równych 3.5%, 7%, 10% oraz 15% szerokości szczeliny.

## Rozdział 3: Badanie charakterystyk przepływu między wirującymi tarczami turbiny Tesli – Papers III, and IV

### Zakres badań

Ogólne parametry konstrukcyjne, takie jak liczba dysz oraz ich konfiguracja, stanowią istotne wyzwanie w pełnym wykorzystaniu potencjału turbiny Tesli, co jest przedmiotem badań w niniejszym rozdziale rozprawy.

Konfiguracja dysz i projekt układu zasilania: Badanie dotyczy dyfuzji pędu oraz transferu energii kinetycznej w wąskiej, submilimetrowej szczelinie między wirującymi tarczami, ze szczególnym uwzględnieniem złożonego charakteru przepływu wynikającego z wirowania i turbulencji. Analizowane były różne konfiguracje dysz, porównując układy one-to-one, gdzie każda dysza zasila pojedynczą szczelinę, z układami one-to-many, gdzie jedna dysza dostarcza czynnik roboczy do wielu szczelin. Dodatkowo badane są dwa warianty układu zasilania: N6 – system sześciu dysz oraz N40 – system czterdziestu dysz, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na sprawność turbiny, charakter zmienności przepływu oraz rozkład naprężeń stycznych na ścianach.

Metody modelowania turbulencji: W tej części porównano dwa podejścia do modelowania turbulencji: model  $k - \omega$  SST, efektywny obliczeniowo i przydatny w zastosowaniach inżynierskich, oraz metodę LES z zastosowaniem modelu podsiatkowego Smagorinsky subgrid-scale (SGS), umożliwiającą odwzorowanie przepływu z wysoką wiernością poprzez rozwiązywanie większych struktur turbulentnych. Ocena obejmuje zdolność obu modeli do uchwycenia kluczowych cech przepływu, takich jak struktury, fluktuacje, rozkłady naprężeń stycznych oraz ogólna sprawność turbiny, wskazując ich mocne strony oraz ograniczenia w symulacjach złożonych przepływów turbulentnych.

### Turbina Tesli z różnymi konfiguracjami zasilania

Rozważono dwa warianty układu zasilania: z sześcioma dyszami (N6) oraz z czterdziestoma dyszami (N40), przy czym w obu przypadkach zastosowano układ jeden-do-jednego, w którym każdej szczelinie odpowiada oddzielna dysza. W celu ograniczenia nakładu obliczeniowego zastosowano zmniejszoną domenę obliczeniową. Przepływ w każdej domenie, składającej się z jednej dyszy wlotowej i okresowego segmentu

jednego szczeliny między dyskami, został poddany analizie. Do weryfikacji wyników modelu turbulencji  $k - \omega SST$  w przypadku N6 zastosowano metodę LES z modelem podsiatkowym Smagorinsky (SGS). Analiza wyników wskazuje, że model  $k - \omega SST$  dostarcza cennych informacji przy odpowiedniej dokładności. Z porównania wyników modelu  $k - \omega SST$  i symulacji LES wynika, że chociaż model  $k - \omega SST$  nieznacznie zawyża wartości parametrów ogólnych i tłumi fluktuacje, nadal dostarcza wartościowych danych do oceny struktur przepływu. Zweryfikowany model turbulencji został następnie zastosowany do symulacji przypadku N40 w celu oceny struktury przepływu, parametrów przepływu oraz ich wpływu na wydajność systemu. Wykorzystanie dużej liczby strumieni dysz powoduje zauważalną interakcję dyszy wlotowej, przejawiającą się fluktuacjami parametrów w pobliżu zewnętrznej krawędzi dysków. Ponadto zwiększa to masowy przepływ medium, skutkując niemal czterokrotnym wzrostem generowanej mocy. Jednakże prowadzi to również do spadku sprawności systemu o niemal 16 punktów procentowych. Porównanie konfiguracji dysz N6 i N40 zostało szczegółowo opisane w Paper III.

## Turbina Tesli z różnymi konfiguracjami dysz

Ta część badań koncentrowała się na dwóch konfiguracjach turbiny Tesli z sześcioma dyszami: jednej z układem one-to-one, w którym każda dysza zasilająca odpowiada pojedynczej szczelinie (oznaczonej jako N6O-O), oraz drugiej z układem one-to-many, w którym jedna dysza zasila wszystkie szczeliny (oznaczonej jako N6O-M). W przypadku N6O-O w symulacji uwzględniono, że grubość komory wlotowej odpowiada rozmiarowi szczeliny. W N6O-M, oprócz rozmiaru szczeliny, do grubości komory zasilającej wliczono połowę średnicy dysku. Konfiguracja one-to-one umożliwia bezpośredni przepływ strumienia dyszy przez szczelinę, podczas gdy konfiguracja one-to-many powodowała straty wynikające z interakcji strumienia wlotowego z końcami dysków. Każdy przypadek wykazywał symetryczne zachowanie co 60 stopni w badanej geometrii, przy czym zastosowano zmniejszoną domenę obliczeniową. Do symulacji przepływu wykorzystano LES z modelem podsiatki Smagorinsky (SGS), co pozwoliło na porównanie struktur przepływu, fluktuacji, parametrów oraz ich wpływu na wydajność systemu. Ocena jakości siatki dla symulacji LES została przedstawiona w Paper IV.

Analiza parametryczna uzyskanych wyników wykazuje, że wyższy masowy przepływ medium oraz tworzenie się struktury zbieżno-rozbieżnej przepływu w obszarze w pobliżu dyszy wlotowej powodują wzrost prędkości i spadek ciśnienia w tym rejonie w przypadku N6O-M. Ponadto w N6O-M natężenie naprężeń Reynoldsa wzrasta w miarę zbliżania się do środka szczeliny. W przeciwieństwie do tego, w przypadku N6O-O, gdzie jedynym źródłem fluktuacji są naprężenia ścinające przyścienne, wartości maksymalne obserwuje się w pobliżu powierzchni dysków, a ich wielkość maleje w kierunku środka szczeliny.

## Osiągnięcia

Model  $k - \omega SST$ , mimo że nieco zawyża moment obrotowy i naprężenia styczne ścian (~4.25%), zapewnia szybkie i wystarczająco dokładne przewidywania ogólnego zachowania przepływu przy znacznie niższych kosztach obliczeniowych.

Model LES, choć bardziej wymagający obliczeniowo, lepiej odwzorowuje fluktuacje, szczególnie w rejonach bliskich zewnętrznej krawędzi tarcz, gdzie powstają wiry i zachodzi najbardziej istotny transfer pędu.

Liczba i konfiguracja dysz mają istotny wpływ na charakterystykę przepływu. Większa liczba dysz zwiększa strumień masy i moc wyjściową (nawet do czterech razy), lecz prowadzi także do złożonych interakcji strug i spadku sprawności systemu o około 16 punktów procentowych.

Porównanie projektów dysz N6O-M i N6O-O wykazuje, że dysza N6O-O jest o 17,8 punktu procentowego bardziej efektywna przy niższym strumieniu masy i wytwarzanej mocy. Charakteryzuje się również wolniejszym przepływem, mniejszą turbulencją oraz bardziej stabilnym rozkładem naprężeń stycznych przy ścianie. Dodatkowo, w przypadku N6O-M, struktura przepływu zbieżno-rozbieżnego w pobliżu wlotu zwiększa prędkość, obniża ciśnienie oraz przesuwają obszar maksymalnych naprężeń ścinających przyściennych w kierunku wewnętrznej średnicy dysku. Powoduje to silniejsze interakcje strumienia z dyskiem, wyższe naprężenia Reynoldsa i większą turbulencję, szczególnie w pobliżu środka szczeliny, w przeciwieństwie do przypadku N6O-O, gdzie fluktuacje są tłumione przez efekty lepkie i pozostają skoncentrowane w pobliżu ścian.

Interakcje struga wlotowa–krawędź tarczy w N6O-M generują znacznie większe fluktuacje niż w N6O-O, gdzie fluktuacje pochodzą głównie z interakcji struga wlotowa–warstwa przyścienna.

## Rozdział 4: Symulacja chropowatości z wykorzystaniem warstwy porowatej (PML) – Paper V

### Zakres badań

Niniejsze badania doktorskie badają alternatywne podejście do modelowania chropowatości powierzchni w CFD, zastępując konwencjonalną metodę zastępczej chropowatości ziaren piasku modelem warstwy porowatej (Porous Medium Layer (PML)). Technika PML polega na dostosowaniu parametrów medium porowatego w celu odwzorowania efektów chropowatości w przepływie płynu, bez konieczności stosowania empirycznych korelacji dla ziaren piasku. Model został zweryfikowany na podstawie eksperymentalnych pomiarów spadku ciśnienia w minikanalach, a następnie przetestowany w symulacjach turbiny Tesli w porównaniu z modelem chropowatości Aupoix. Przy zastosowaniu modelu turbulencji  $k - \omega SST$ , zweryfikowanego poprzez porównanie z wynikami LES dla gładkich ścian, przeprowadzono analizę parametryczną różnych grubości warstwy porowatej w celu oceny ich wpływu na sprawność turbiny, zachowanie przepływu oraz transfer pędu. Wyniki te wskazują na potencjał modelu PML w bardziej dokładnym odwzorowaniu chropowatości w analizach przepływu w turbinach.

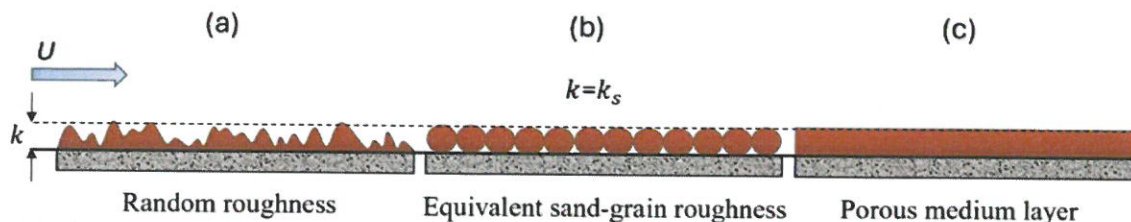
### Symulacja turbiny Tesli z modelem chropowatości

Wydajność modelu chropowatości PML została początkowo przetestowana w minikanalach poprzez badania numeryczne i eksperymentalne dla minikanalu o szerokości 50 mm, długości 150 mm i wysokości 0.75 mm, przy różnych prędkościach przepływu. Uwzględniono rozwinięty przepływ wlotowy oraz ciśnienie otoczenia na wylocie. Ściany boczne były gładkie, natomiast ściany górna i dolna charakteryzowały się chropowatością.

W symulacjach uwzględniono chropowatość za pomocą metody Aupoix oraz za pomocą korekcji oporu przy użyciu modelu PML. Wysokość chropowatości wynosiła 60  $\mu m$ . Grubość warstwy porowatej została ustawiona równą najwyższemu wzniesieniu chropowatości, natomiast przepuszczalność została

dostosowana w celu modyfikacji generowanego oporu w minikanalach. Aby zapewnić zgodność oporu w minikanalach z teoretycznymi przewidywaniami dla chropowatości  $60\ \mu\text{m}$ , przepuszczalność przyjęto równą  $K = 23\ \text{nm}^2$ . W badaniach założono, że porowatość zmienia się od zera do jedności jako funkcja drugiego rzędu grubości strefy porowatej, przy czym pochodna w interfejsie między strefą porowatą a przepływem wynosi zero. Wyniki symulacji CFD zostały zweryfikowane w oparciu o badania eksperymentalne.

W następnej fazie model PML został zastosowany w symulacji turbiny Tesli wyposażonej w sześć dysz (N6O-M). Rys. 1 przedstawia schematycznie rzeczywistą chropowatość, równoważną chropowatość ziarn piasku stosowaną w metodzie Aupoixa oraz warstwę porowatą w metodzie PML.



Rys. 1. Schematy: (a) rzeczywista losowa chropowatość, (b) równoważna chropowatość ziaren piasku, (c) warstwa porowata o grubości równej najwyższemu szczytowi chropowatości.

W tej części pracy oceniano efektywność doboru parametrów metody chropowatości PML w symulacjach turbiny Tesli ze szczeliną o wymiarze  $0.75\ \text{mm}$ . W modelu warstwa ośrodka porowatego została dodana po obu stronach powierzchni dysków. Otrzymane w wyniku symulacji parametry globalne porównano następnie z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody Aupoix. Na powierzchniach tarcz turbiny Tesli zastosowano warstwę porowatą z tymi samymi modyfikacjami, które wcześniej testowano w minikanalach. W badaniu uwzględniono trzy wysokości chropowatości:  $30\ \mu\text{m}$  (N6-S-R30),  $60\ \mu\text{m}$  (N6-S-R60) oraz  $120\ \mu\text{m}$  (N6-S-R120). Porównano parametry ogólne turbiny dla przypadków gładkich i chropowatych.

W miarę wzrostu chropowatości powierzchni wirujących tarcz dochodzi do większego transferu pędu między czynnikiem roboczym a tarczami, co skutkuje szybszym spadkiem poziomu energii przepływu. Składowa prędkości stycznej, odpowiedzialna za generację momentu obrotowego, również szybciej maleje przy wzroście naprężeń stycznych ścian wynikających z wyższej chropowatości, co poprawia transfer pędu.

Dzieje się tak, ponieważ chropowate powierzchnie zmniejszają grubość warstwy przyściennej, powodując zwiększoną interakcję między cieczą a obracającymi się powierzchniami, co prowadzi do bardziej efektywnego generowania siły oporu, a w konsekwencji wzrostu momentu obrotowego i mocy wyjściowej.

## Osiągnięcia

Opracowanie i walidacja modelu PML, bazującego na danych eksperymentalnych z minikanalu odpowiadającego wysokości szczeliny turbiny Tesli, wykazały, że metoda ta może dokładnie odwzorowywać rzeczywiste geometrie chropowatości w symulacjach bez konieczności stosowania dokładnej siatki przyściennej, co pozwala obniżyć koszty obliczeniowe przy zachowaniu dokładności.

Porównanie z metodą chropowatości Aupoix pokazuje, że PML daje zgodne trendy przy jedynie niewielkich rozbieżnościach w parametrach ogólnych. Rozdzielenie przepływu spowodowane przez strugę wlotową w

szczelinie tworzy w tym obszarze strukturę przepływu typu zwężająco-rozszerzającego. Wraz ze wzrostem wysokości chropowatości zjawisko to jest tłumione przez siły lepkościowe, co prowadzi do bardziej płynnego przenoszenia przepływu roboczego od wlotu do wylotu.

Zwiększenie wysokości chropowatości w modelu PML przyspieszało spadek energii kinetycznej w przepływie, co prowadziło do poprawy sprawności systemu w porównaniu z modelem Aupoix. Oba modele wykazały maksymalną różnicę sprawności wynoszącą 2.7 punktu procentowego przy wysokości chropowatości  $120\text{ }\mu\text{m}$ .

Analiza wyników dla przypadków gładkiego oraz dwóch wariantów chropowatości ( $30\text{ }\mu\text{m}$  i  $60\text{ }\mu\text{m}$ ) przy różnych prędkościach obrotowych wykazuje, że chropowatość wywiera największy wpływ na poprawę sprawności turbiny, gdy prędkość obrotowa mieści się w zakresie  $17000 - 26000\text{ obr./min}$ . Zaobserwowano, że zastosowanie porowatej warstwy o grubości  $60\text{ }\mu\text{m}$  w porównaniu do przypadku gładkiego skutkowało poprawą sprawności o 4.61 punktu procentowego przy prędkości obrotowej  $22000\text{ obr./min}$ .

## Rozdział 5: Modelowanie chropowatości za pomocą warstwy porowatej (PML) w turbinie Tesli pracującej na czynnikach ORC

### Zakres badań

Turbina Tesli posiada istotny potencjał do zastosowania w systemach ORC. W niniejszym rozdziale przeprowadzono kompleksową analizę mającą na celu symulację wpływu chropowatości powierzchni na przepływ w szczelinie pomiędzy wirującymi tarczami turbiny Tesli, przy zastosowaniu dwóch niskowrzących czynników roboczych: R1234yf oraz n-heksanu. Symulacje przepływu wykonano z wykorzystaniem modelu turbulencji  $k - \omega\text{ SST}$ , w celu oceny, jak chropowatość powierzchni wpływa na transfer pędu, kluczowe parametry przepływu oraz ogólną sprawność turbiny. Dodatkowo przeprowadzono porównanie charakterystyk przepływu dla obu czynników roboczych w turbinie Tesli, wykazując, że model PML skutecznie odwzorowuje efekty chropowatości. Przeprowadzono również analizę porównawczą przypadków z powierzchniami gładkimi i chropowatymi w celu ilościowego określenia poprawy sprawności oraz wyjaśnienia specyficznego zachowania dla danego czynnika roboczego.

### Symulacja turbiny Tesli z modelowaniem chropowatości

Wydajność dostosowanych parametrów metody chropowatości PML została zweryfikowana za pomocą danych eksperymentalnych z minikanalu przedstawionych w Rozdziale 4. W tej części metoda ta jest testowana w symulacjach turbiny Tesli (N6O-M) pracującej na gazie rzeczywistym. Ponieważ rozważanym medium roboczym w tym badaniu jest gaz rzeczywisty, rozmiar szczeliny jest sześć razy mniejszy niż w przypadku opisanym w Rozdziale 4. Jednak zastosowanie sześciokrotnie mniejszej grubości warstwy PML nie pozwala w pełni zobrazować wpływu chropowatości powierzchni na charakterystyki przepływu i wydajność turbiny, dlatego w obu przypadkach zastosowano grubszą warstwę PML równą  $28,8\text{ }\mu\text{m}$ .

Warunki brzegowe zastosowane w symulacjach CFD zostały dobrane tak, aby czynnik roboczy pozostawał w obszarze przegrzanego pary, co umożliwiało dokładne modelowanie przepływu jednofazowego w turbinie Tesli. W przypadku R1234yf maksymalna sprawność występuje przy niższych prędkościach ( $\sim 5000 \text{ obr./min}$ ), przy czym powierzchnie chropowate dają maksimum  $\sim 27\%$ , w porównaniu do  $\sim 18\%$  dla powierzchni gładkich, co oznacza poprawę o 50%. Natomiast n-heksan osiąga najlepsze wyniki przy wyższych prędkościach ( $\sim 12000 \text{ obr./min}$ ), gdzie chropowatość zwiększa maksymalną sprawność z  $\sim 8\%$  do  $\sim 15\%$ , co odpowiada wzrostowi o 87.5%. Krzywe sprawności dla wszystkich przypadków mają przebieg paraboliczny, osiągając maksimum przed spadkiem. Wyniki te wykazują, że chropowatość powierzchni poprawia sprawność dla obu czynników roboczych. R1234yf jest bardziej odpowiedni dla prędkości niskich i umiarkowanych, natomiast n-heksan sprawdza się najlepiej przy prędkościach wysokich. Analiza podkreśla kluczową rolę zarówno doboru czynnika roboczego, jak i stanu powierzchni w maksymalizacji sprawności turbiny Tesli.

## Osiągnięcia

Zweryfikowany model został zastosowany do symulacji rozprężania dwóch czynników ORC — R1234yf oraz n-heksanu — w turbinie Tesli, co wykazało adaptacyjność metody dla czynników o właściwościach gazu rzeczywistego i szerokim zakresie prędkości roboczych.

Chropowatość powierzchni może znacząco poprawić sprawność turbiny. Dla R1234yf sprawność wzrosła z  $\sim 18\%$  do  $\sim 27\%$  przy  $5000 \text{ obr./min}$ , natomiast dla n-heksanu wzrosła z  $\sim 8\%$  do  $\sim 15\%$  przy  $12000 \text{ obr./min}$ .

Analiza przepływu wykazała, że R1234yf zapewniał bardziej jednorodne i stabilne pole prędkości, co sprzyjało lepszemu wykorzystaniu energii przy niższych prędkościach. W przeciwieństwie do tego, n-heksan generował przepływ silniejszy, lecz mniej wydajny, z powodu wysokich strat energii i skróconego czasu przebywania w strefie przepływu.

Model chropowatości pomógł ograniczyć niektóre czynniki ograniczające wydajność systemu przy n-heksanie, prowadząc do poprawy jednorodności przepływu oraz zwiększenia transferu momentu pędu.

## Wnioski

Kluczowe ustalenia niniejszej pracy doktorskiej zostały przedstawione w sześciu kategoriach:

### 1- Modelowanie turbulencji:

- Model  $k - \omega$  SST zapewniał wiarygodne przewidywania zachowania przepływu i naprężeń ścinających w konfiguracjach współwirujących tarcz oraz w symulacjach turbiny Tesli, szczególnie w przypadkach walidacyjnych i modelowania chropowatości, oferując jednocześnie dobry kompromis między dokładnością a wydajnością obliczeniową.
- Model LES umożliwia lepsze uchwycenie przejściowych i złożonych zjawisk przepływowych, zwłaszcza w pobliżu zewnętrznych krawędzi tarcz, gdzie dominują wiry i fluktuacje, co czyni go idealnym narzędziem do symulacji wysokiej wierności.

### 2- Podejścia do modelowania chropowatości:

- Nie istnieje uniwersalnie akceptowana metoda określania równoważnej chropowatości ziaren piasku, a konwencjonalne modele chropowatości (np. Aupoix) nie odwzorowują dokładnie wpływu rzeczywistych geometrii chropowatości na zachowanie przepływu, szczególnie w przepływach o małych wymiarach przekroju.
- Model chropowatości Aupoix'a dał wyniki zgodne z przypadkiem walidacyjnym mikrokanalu; jednakże posiada ograniczenia, takie jak uproszczone odwzorowanie chropowatości i ograniczona stosowalność w małych lub ograniczonych przepływach.
- Model PML okazał się solidną i elastyczną alternatywą do modelowania powierzchni chropowatych. Został zweryfikowany na podstawie danych eksperymentalnych i wykazał dobre dopasowanie do teoretycznych rozkładów współczynnika tarcia.

### 3- Wpływ chropowatości na przepływ i sprawność:

- Chropowatość zwiększa transfer pędu poprzez wcześniejsze przejście do turbulencji i wzrost energii kinetycznej turbulentnej ( $k$ ) w pobliżu powierzchni tarcz.
- Wyższa chropowatość prowadzi do bardziej jednorodnych profili prędkości, większych naprężeń ścinających przy ścianach, szczególnie w zewnętrznym obszarze tarczy, oraz znacznej poprawy mocy wyjściowej i sprawności.
- W optymalnych zakresach pracy (np. 17000–26000 obr./min przy przepływie powietrza) odnotowano poprawę sprawności sięgającą do 4.61 punktu procentowego w wyniku zastosowania chropowatości o wysokości  $60\ \mu\text{m}$ .

### 4- Wpływ parametrów konstrukcyjnych:

- Zwiększenie liczby dysz podnosi strumień masy i moc wyjściową, ale może również zwiększać turbulencję i obniżać ogólną sprawność.
- Konfiguracja dysz (np. one-to-one vs. one-to-many) znacząco wpływa na zachowanie przepływu:
- Konfiguracje one-to-many generują silniejsze fluktuacje prędkości i wyższe naprężenia ścinające przy ścianach.
- Interakcje strumieni z krawędziami tarcz nasilają turbulencję oraz wpływają na naprężenia Reynoldsa i dyssypację energii.

### 5- Kompatybilność czynnika roboczego:

- Wydajność turbiny Tesli jest silnie uzależniona od dopasowania czynnika roboczego do konstrukcji.
- R1234yf sprzyjał bardziej stabilnemu przepływowi i efektywnemu wykorzystaniu energii przy niższych prędkościach obrotowych.
- n-heksan generował większy przepływ promieniowy i większą dyssypację energii, lecz nadal wykazywał poprawę transferu pędu dzięki chropowatości.

### 6- Ogólny wkład i strategia optymalizacji:

- Badania potwierdzają, że dokładne modelowanie CFD, w szczególności turbulencji i chropowatości, jest kluczowe dla optymalizacji konstrukcji turbiny Tesli.
- Inżynieria chropowatości odgrywa istotną rolę w kontrolowaniu zachowania warstwy granicznej i zwiększaniu efektywności konwersji energii.

Model PML wykazuje duży potencjał do dalszego udoskonalenia poprzez uwzględnienie rzeczywistych geometrii chropowatości w definicjach parametrów.