

Dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. PRz
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-029 Rzeszów
Tel.: +48 17 865 16 04
Andrzej.majka@prz.edu.pl
<https://kilik.prz.edu.pl/>

Rzeszów, 2026-05-25

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Jana MICHNY

**nt. „Modelling of laminar-to-turbulent transition and laminar separation
bubbles using Computational Fluid Dynamics methods in the case
of aerodynamic analysis of a laboratory-scale Vertical-Axis Wind Turbine”
promotor: dr hab. inż. Krzysztof Rogowski, prof. uczelni**

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, będącą konsekwencją Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej nr 300/III-IM/2026 z dnia 11 marca 2026 r.

Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska została przygotowana w formie cyklu siedmiu powiązanych tematycznie publikacji naukowych opublikowanych w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Cykl uzupełniono autorskim opracowaniem syntetyzującym, zawierającym przegląd literatury, identyfikację luk badawczych, sformułowanie celów i hipotez badawczych oraz podsumowanie uzyskanych wyników.

Tematyka rozprawy koncentruje się na zagadnieniach aerodynamiki turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu (VAWT), ze szczególnym uwzględnieniem modelowania zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej przy niskich liczbach Reynoldsa. Głównym problemem badawczym było określenie wpływu przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych na charakterystyki aerodynamiczne profili i wirników VAWT oraz ocena



możliwości ich odwzorowania z wykorzystaniem współczesnych metod obliczeniowej mechaniki płynów.

1. Ocena wyboru tematu badawczego

Wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jana Michny należy ocenić pozytywnie. Autor podjął problem aktualny, technicznie istotny i naukowo uzasadniony, mieszczący się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w szczególności w obszarze mechaniki płynów, aerodynamiki obliczeniowej oraz modelowania maszyn przepływowych.

Przedmiotem rozprawy jest modelowanie przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych w analizie aerodynamicznej turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu, pracujących w warunkach charakterystycznych dla skali laboratoryjnej. Tematyka ta wykracza poza rutynową analizę inżynierską, ponieważ dotyczy wiarygodności metod CFD w zakresie, w którym powszechnie stosowane modele turbulencji mogą prowadzić do istotnych rozbieżności względem rzeczywistego charakteru przepływu.

1.1. Aktualność podjętej problematyki

Problematyka rozprawy jest aktualna zarówno z perspektywy rozwoju energetyki wiatrowej, jak i współczesnej aerodynamiki obliczeniowej. Turbiny wiatrowe o pionowej osi obrotu pozostają przedmiotem intensywnych badań ze względu na potencjalne zastosowania w energetyce rozproszonej, środowisku miejskim oraz wybranych konfiguracjach offshore. Ich zaletami są m.in. niezależność od kierunku napływu oraz możliwość korzystnego rozmieszczenia elementów układu napędowego.

Jednocześnie przewidywanie charakterystyk aerodynamicznych turbin VAWT jest trudne ze względu na zmienny kąt natarcia łopat, niestacjonarny charakter przepływu, oddziaływanie łopat ze śladem aerodynamicznym oraz możliwość występowania przeciągnięcia dynamicznego. W warunkach skali laboratoryjnej dodatkowego znaczenia nabierają niskie liczby Reynoldsa i wpływ poziomu turbulencji na przejście laminarno-turbulentne.

Aktualność tematu wynika również z ograniczeń modeli CFD. Modele RANS i URANS są nadal szeroko stosowane ze względu na umiarkowany koszt obliczeniowy, jednak ich przydatność w analizie przepływów przejściowych i separacyjnych wymaga starannej walidacji. Z kolei metody wyższej wierności, takie jak LES czy DNS, są kosztowne i nie zawsze dostępne w praktyce inżynierskiej. Ocena możliwości modeli takich jak Transition SST stanowi więc ważny i aktualny problem badawczy.

1.2. Znaczenie naukowe problemu

Znaczenie naukowe rozprawy wiąże się przede wszystkim z analizą wpływu zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej na charakterystyki aerodynamiczne profili oraz wirników VAWT. Przejście laminarno-turbulentne i laminarne bąble separacyjne są zjawiskami silnie nieliniowymi, zależnymi m.in. od liczby Reynoldsa, gradientu ciśnienia, chropowatości

powierzchni, poziomu turbulencji oraz historii ruchu profilu. Ich obecność może znacząco wpływać na siłę nośną, opór, moment aerodynamiczny i przebieg histerezy obciążeń.

Istotą pracy nie jest samo zastosowanie wybranego programu CFD do obliczeń konkretnej konfiguracji, lecz ocena, w jakim stopniu współczesne modele numeryczne pozwalają odwzorować fizykę przepływu w zakresie niskich liczb Reynoldsa. Szczególnie ważne jest porównanie modeli zakładających w pełni turbulentną warstwę przyścienną z modelem przejścia laminarno-turbulentnego.

Naukową wartość rozprawy wzmacnia analiza prowadzona na kilku poziomach złożoności: od profili aerodynamicznych, przez ruch oscylacyjny, po pracę wirnika i ślad aerodynamiczny. Pozwala to powiązać lokalne zjawiska warstwy przyściennej z globalnymi skutkami aerodynamicznymi. Wkład pracy ma przede wszystkim charakter metodyczno-poznawczy: Autor nie proponuje nowej teorii przejścia, lecz systematycznie ocenia zakres stosowalności istniejących modeli w ważnym i wymagającym obszarze zastosowań.

1.3. Znaczenie aplikacyjne

Znaczenie aplikacyjne rozprawy dotyczy przede wszystkim projektowania, badań tunelowych i interpretacji wyników dla turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Wyniki mogą być przydatne dla zespołów zajmujących się analizą aerodynamiczną małoskalowych turbin VAWT, walidacją modeli CFD oraz budową baz danych aerodynamicznych dla uproszczonych modeli inżynierskich.

Szczególnie ważne jest wskazanie, że wyniki badań prowadzonych przy niskich liczbach Reynoldsa nie powinny być bezkrytycznie przenoszone na warunki pełnoskalowe. Zjawiska przejścia laminarno-turbulentnego i laminarne bąble separacyjne mogą istotnie zmieniać charakterystyki profilu, a tym samym obciążenia łopat i sprawność wirnika.

Praktyczne znaczenie ma również analiza wpływu taśmy turbulizacyjnej. Jej stosowanie w eksperymentach może ograniczać wpływ bąbli separacyjnych i poprawiać powtarzalność wyników, ale jednocześnie zmieniać opór, obciążenia łopat i ślad aerodynamiczny. Jest to istotna wskazówka dla planowania badań tunelowych oraz interpretacji wyników eksperymentalnych.

Rozprawa może być również pomocna przy doborze metod CFD, modeli turbulencji, warunków brzegowych i kryteriów walidacji. Należy jednak zachować ostrożność przy traktowaniu jej wyników jako bezpośrednich zaleceń projektowych dla pełnoskalowych turbin, ponieważ część analiz dotyczy warunków laboratoryjnych i modeli uproszczonych. Mimo tego aplikacyjna wartość pracy jest wyraźna, gdyż Autor identyfikuje ograniczenia narzędzi powszechnie stosowanych w praktyce inżynierskiej

2. Ocena rozprawy jako osiągnięcia naukowego

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jana Michny stanowi spójne osiągnięcie naukowe w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w obszarze aerodynamiki obliczeniowej i mechaniki płynów. Jej wartość wynika przede wszystkim z kompleksowej analizy zjawisk przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych w odniesieniu do profili i wirników turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu. Autor nie ograniczył się do rozwiązania pojedynczego zadania obliczeniowego, lecz podjął próbę oceny przydatności współczesnych metod CFD do modelowania przepływów przy niskich liczbach Reynoldsa, w warunkach typowych dla badań laboratoryjnych.

2.1 Cel pracy i problem badawczy

Cel pracy został sformułowany poprawnie i odpowiada poziomowi rozprawy doktorskiej. Dotyczy on określenia wpływu przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych na charakterystyki aerodynamiczne profili i wirników VAWT, a także oceny możliwości ich odwzorowania z wykorzystaniem metod numerycznych.

Problem badawczy ma charakter naukowy, ponieważ odnosi się do wiarygodności modelowania złożonych zjawisk przepływowych, a nie tylko do projektowej analizy konkretnej geometrii. Autor słusznie wskazuje, że w warunkach niskich liczb Reynoldsa klasyczne modele zakładające w pełni turbulentną warstwę przyścienną mogą prowadzić do pominięcia istotnych efektów fizycznych. W pracy podjęto zatem próbę odpowiedzi na pytanie, w jakim zakresie modele takie jak Transition SST mogą być stosowane do analizy przepływów przejściowych wokół profili i łopatek turbin VAWT.

Pozytywnie należy ocenić powiązanie celu pracy z hipotezami i predykcjami badawczymi. Pewnym mankamentem jest natomiast duża liczba sformułowanych luk, hipotez i predykcji, co miejscami utrudnia szybkie uchwycenie głównej osi rozprawy. Korzystne byłoby syntetyczne zestawienie pokazujące relację: luka badawcza, hipoteza, publikacja, metoda, kluczowy wynik.

2.2. Stan wiedzy i analiza literatury

Analiza literatury została przeprowadzona rzetelnie i obejmuje zarówno klasyczne prace dotyczące aerodynamiki profili, jak i współczesne badania nad turbinami VAWT, modelowaniem przejścia laminarno-turbulentnego oraz metodami CFD. Autor właściwie identyfikuje znaczenie niskich liczb Reynoldsa, poziomu turbulencji i zjawisk separacyjnych dla interpretacji wyników badań tunelowych.

Na uznanie zasługuje krytyczne podejście do dostępnych danych literaturowych. Autor trafnie wskazuje, że historyczne charakterystyki aerodynamiczne nie zawsze odpowiadają warunkom współczesnych eksperymentów w tunelach o niskiej turbulencji, a bezpośrednie wykorzystywanie takich danych w modelach inżynierskich może prowadzić do błędnych

wniosków. Dobrze uzasadniono również potrzebę walidacji modeli CFD w zakresie przepływów przejściowych.

Pewnym ograniczeniem jest jednak rozbudowanie części wprowadzającej. W rozprawie publikacyjnej, w której poszczególne artykuły zawierają własne przeglądy literatury, część syntetyczna mogłaby być bardziej skoncentrowana na integracji wyników i pokazaniu wspólnego wkładu całego cyklu.

2.3. Metodyka badań

Metodyka badań została dobrana zasadniczo poprawnie i jest jedną z mocnych stron rozprawy. Autor wykorzystał różne poziomy modelowania, obejmujące analizy profili aerodynamicznych, symulacje przepływów nieustalonych, modelowanie ruchu oscylacyjnego, analizy wirnika VAWT oraz podejścia uproszczone stosowane w modelowaniu całych turbin. W zakresie badań numerycznych zastosowano m.in. modele URANS, klasyczny model SST, model Transition SST, podejście SAS oraz model Actuator Line Model. Dobór tych narzędzi jest uzasadniony, ponieważ pozwala porównać modele o różnym poziomie złożoności i wskazać ich ograniczenia. Autor prawidłowo zwraca uwagę na znaczenie jakości siatki, wartości parametru y^+ , doboru kroku czasowego oraz walidacji wyników.

Istotną wartością pracy jest połączenie analiz numerycznych z danymi eksperymentalnymi. Badania tunelowe oraz dane literaturowe umożliwiają ocenę wiarygodności modeli. Należy jednak podkreślić, że część analiz opiera się na modelach dwuwymiarowych, podczas gdy zjawiska takie jak separacja, przeciągnięcie dynamiczne, struktury wirowe w śladzie i efekty końcowe łopat mają charakter trójwymiarowy. W przyszłych badaniach wskazane byłoby szersze wykorzystanie modeli 3D lub hybrydowych oraz pogłębiona analiza wrażliwości siatki w obszarze śladu aerodynamicznego.

W przypadku eksperymentów przy bardzo niskich liczbach Reynoldsa przydatne byłoby również bardziej rozbudowane omówienie niepewności pomiarowej, zwłaszcza dla pomiarów oporu i przypadków, w których ciśnienie dynamiczne jest małe.

2.4. Wyniki badań

Wyniki przedstawione w rozprawie są wartościowe i tworzą logiczny ciąg badawczy. Autor analizuje kolejno wpływ liczby Reynoldsa i intensywności turbulencji na charakterystyki profili, zachowanie profilu NACA 0018 przy niskich liczbach Reynoldsa, odpowiedź profilu w ruchu oscylacyjnym, modelowanie pracy wirnika VAWT oraz wpływ taśmy turbulizacyjnej na obciążenia i ślad aerodynamiczny.

Za szczególnie istotne należy uznać wykazanie, że modelowanie przejścia laminarno-turbulentnego może mieć zasadniczy wpływ na przewidywanie sił aerodynamicznych, oporu oraz przebiegu histerezy obciążeń. Autor pokazuje, że klasyczne modele w pełni turbulentne mogą prowadzić do nadmiernego uproszczenia opisu przepływu i maskowania wpływu laminarnych błędów separacyjnych.

Cenne są również wyniki dotyczące taśmy turbulizacyjnej. Wskazują one, że wymuszenie przejścia może nie tylko zmieniać lokalne charakterystyki profilu, lecz także wpływać na obciążenia łopat i ślad aerodynamiczny wirnika. Jest to wynik ważny dla interpretacji badań tunelowych.

Ograniczenia wyników wynikają głównie z przyjętych modeli numerycznych i uproszczeń geometrycznych. Niektóre wnioski, szczególnie dotyczące pracy pełnego wirnika i śladu aerodynamicznego, powinny być interpretowane z uwzględnieniem ograniczeń modeli 2D, korelacyjnego charakteru modelu Transition SST oraz uproszczeń takich jak pominięcie wybranych elementów konstrukcyjnych wirnika.

2.5. Oryginalność osiągniętych wyników

Oryginalność rozprawy ma przede wszystkim charakter metodyczno-poznawczy. Autor nie proponuje nowej teorii przejścia laminarno-turbulentnego ani nowego modelu turbulencji, lecz w sposób systematyczny ocenia zakres stosowalności istniejących modeli w trudnym i praktycznie istotnym obszarze aerodynamiki turbin VAWT.

Do najważniejszych oryginalnych elementów pracy należy zaliczyć powiązanie zjawisk przejścia laminarno-turbulentnego i laminarnych bąbli separacyjnych z charakterystykami aerodynamicznymi profili oraz obciążeniami wirnika VAWT, ocenę wpływu liczby Reynoldsa i intensywności turbulencji w warunkach laboratoryjnych, analizę wpływu taśmy turbulizacyjnej na ślad aerodynamiczny oraz rozwój procedur interpretacji lokalnego kąta natarcia łopat.

Wkład naukowy rozprawy polega więc na uporządkowaniu, zweryfikowaniu i pogłębieniu wiedzy dotyczącej modelowania przepływów przejściowych w zastosowaniu do turbin VAWT. Jest to wkład istotny dla dyscypliny inżynieria mechaniczna, szczególnie w obszarze mechaniki płynów i aerodynamiki obliczeniowej. Wskazane w recenzji ograniczenia nie podważają wartości rozprawy, lecz wyznaczają naturalne kierunki dalszych badań.

3. Ocena cyklu publikacji stanowiącego rozprawę doktorską

Rozprawa doktorska została przygotowana w formie cyklu siedmiu powiązanych tematycznie publikacji naukowych, uzupełnionych autorskim opracowaniem syntetyzującym. Taka forma rozprawy jest właściwa dla przedstawionej problematyki, ponieważ pozwala zaprezentować kolejne etapy programu badawczego: od analizy profili aerodynamicznych, przez ocenę wpływu liczby Reynoldsa i turbulencji, po modelowanie pracy wirnika VAWT oraz wpływu taśmy turbulizacyjnej na obciążenia i ślad aerodynamiczny.

3.1. Spójność merytoryczna cyklu

Cykl publikacji należy uznać za spójny merytorycznie. Wszystkie prace koncentrują się wokół głównego problemu rozprawy, którym jest modelowanie przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych w aerodynamice profili i turbin wiatrowych o pionowej

osi obrotu. Kolejne publikacje tworzą logiczny ciąg badawczy, prowadzący od zagadnień podstawowych do bardziej złożonych analiz wirnika.

Na początku cyklu Autor analizuje możliwości modelowania przejścia laminarno-turbulentnego dla profili aerodynamicznych. Następnie przenosi uwagę na profil NACA 0018 w zakresie niskich liczb Reynoldsa, charakterystycznym dla badań laboratoryjnych turbin VAWT. W dalszej kolejności rozszerza analizę o badania eksperymentalne, ruch oscylacyjny profilu, pracę wirnika, estymację lokalnego kąta natarcia oraz wpływ wymuszonego przejścia na obciążenia i ślad aerodynamiczny.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że Autor nie ograniczył się do mechanicznego zestawienia artykułów. Część syntetyczna rozprawy porządkuje główne luki badawcze, hipotezy i wyniki, dzięki czemu cykl można traktować jako jednolite osiągnięcie naukowe. Pewnym ograniczeniem jest jednak typowa dla rozpraw publikacyjnych redundancja treści wprowadzających w poszczególnych artykułach. W części syntetycznej przydatne byłoby również bardziej zwarte zestawienie pokazujące relację: publikacja, hipoteza, metoda, najważniejszy wynik, ograniczenia.

3.2. Ocena poszczególnych publikacji

Pierwsza publikacja cyklu dotyczy oceny dokładności modelu przejścia $\gamma - Re_\theta$ dla profilu aerodynamicznego DU-91-W2-250 przy wysokich liczbach Reynoldsa. Jej znaczenie polega na wprowadzeniu problemu modelowania przejścia oraz ocenie przydatności modelu korelacyjnego w analizie aerodynamicznej profilu. Ograniczeniem tej pracy jest przede wszystkim zakres stosowalności modelu przy większych kątach natarcia oraz uproszczenia wynikające z przyjętego modelu obliczeniowego.

Druga publikacja, poświęcona wpływowi liczby Reynoldsa i intensywności turbulencji na charakterystyki profilu NACA 0018, stanowi jeden z kluczowych elementów cyklu. Autor analizuje warunki istotne dla laboratoryjnych turbin VAWT i pokazuje, że zmiana liczby Reynoldsa oraz poziomu turbulencji może istotnie wpływać na charakterystyki aerodynamiczne. Zastrzeżenia dotyczą głównie ograniczeń podejścia 2D URANS oraz trudności w precyzyjnym odwzorowaniu lokalnego poziomu turbulencji przy profilu.

Trzecia publikacja ma charakter eksperymentalny i dotyczy analizy profilu NACA 0018 przy niskich liczbach Reynoldsa w tunelu o niskiej turbulencji. Jej wartość polega na dostarczeniu danych eksperymentalnych w zakresie, w którym literatura jest ograniczona. Należy jednak zauważyć, że pomiary przy bardzo niskich liczbach Reynoldsa są obciążone znaczną wrażliwością na niepewność pomiarową, chropowatość powierzchni, geometrię modelu oraz warunki tunelowe.

Czwarta publikacja, dotycząca harmonicznego ruchu profilu NACA 0018, rozszerza analizę o zagadnienia nieustalone. Jest to ważne ogniwo łączące statyczne charakterystyki profilu z rzeczywistą pracą łopat VAWT. Szczególnie cenne jest pokazanie wpływu modelowania

przejścia na przebieg histerezy obciążeń. Ograniczeniem pozostaje dwuwymiarowy charakter obliczeń.

Piąta publikacja, obejmująca analizę wirnika VAWT z ustalonym kątem zaklinowania łopat, przenosi rozważania na poziom całego układu wirnikowego. Jest to istotny etap cyklu, ponieważ pozwala ocenić skutki zjawisk opisanych wcześniej na poziomie profilu. Wartościowe jest wykorzystanie bardziej zaawansowanego podejścia do modelowania przepływu, jednak uproszczenia geometryczne i pominięcie wybranych elementów konstrukcyjnych mogą wpływać na dokładność predykcji śladu aerodynamicznego.

Szósta publikacja, dotycząca estymacji lokalnego kąta natarcia i histerezy sił w turbinach Darrieusa, wnosi istotny element metodyczny. Problem lokalnego kąta natarcia w turbinach VAWT jest trudny, ponieważ wynika z połączenia ruchu obrotowego, prędkości napływu, śladu aerodynamicznego i efektów dynamicznych. Zaproponowana procedura jest przydatna do interpretacji obciążeń łopat, choć jej stosowalność w warunkach silnie oderwanego przepływu wymaga ostrożności.

Siódma publikacja, poświęcona wpływowi taśmy zigzag na obciążenia łopat i ślad aerodynamiczny, jest jednym z najważniejszych elementów cyklu. Pokazuje, że wymuszone przejście może wpływać nie tylko na lokalne charakterystyki profilu, ale również na globalną pracę wirnika i strukturę śladu. Ograniczeniem jest to, że wpływ taśmy analizowano głównie poprzez charakterystyki aerodynamiczne profilu i model ALM, bez pełnego rozpoznania lokalnej mikrodynamiki przepływu wokół samej taśmy.

3.3. Wkład publikacji w rozwiązanie problemu naukowego

Publikacje łącznie realizują główny cel rozprawy, którym jest ocena wpływu przejścia laminarno-turbulentnego i laminarnych bąbli separacyjnych na charakterystyki aerodynamiczne profili oraz wirników VAWT, a także ocena możliwości ich modelowania metodami CFD.

Pierwsze prace cyklu budują podstawę metodyczną, pokazując zalety i ograniczenia modelu Transition SST oraz wpływ liczby Reynoldsa i turbulencji na charakterystyki profili. Publikacja eksperymentalna dostarcza danych koniecznych do walidacji i interpretacji wyników numerycznych. Publikacja dotycząca ruchu oscylacyjnego pozwala przejść od analiz quasi-statycznych do zagadnień dynamicznych. Prace dotyczące wirnika, estymacji kąta natarcia i taśmy zigzag integrują wcześniejsze wyniki z problematyką rzeczywistej pracy turbiny VAWT. Wkład całego cyklu polega zatem nie na pojedynczym wyniku, lecz na systematycznym pokazaniu, że prawidłowe uwzględnienie przejścia laminarno-turbulentnego jest istotne dla wiarygodnej predykcji obciążeń i osiągnięć turbin VAWT w skali laboratoryjnej. Cykl wskazuje również granice stosowalności popularnych modeli CFD, co ma znaczenie zarówno poznawcze, jak i praktyczne

3.4. Ocena indywidualnego wkładu doktoranta

Ocena indywidualnego wkładu doktoranta w przypadku rozprawy publikacyjnej wymaga szczególnej ostrożności, ponieważ publikacje mają charakter współautorski. Na podstawie treści rozprawy oraz załączonych oświadczeń współautorów można jednak stwierdzić, że udział mgr. inż. Jana Michny w przygotowaniu cyklu był istotny i wystarczający do uznania przedstawionych publikacji za podstawę rozprawy doktorskiej.

Doktorant uczestniczył w formułowaniu problematyki badawczej, prowadzeniu analiz numerycznych, interpretacji wyników oraz przygotowaniu publikacji. Szczególnie widoczny jest jego wkład w obszarze modelowania CFD, analizy przejścia laminarno-turbulentnego, interpretacji charakterystyk aerodynamicznych oraz powiązania wyników uzyskanych dla profili z pracą wirnika VAWT.

Należy jednocześnie podkreślić, że w niektórych publikacjach wkład poszczególnych autorów nie ma identycznego charakteru. Jest to naturalne w przypadku badań zespołowych, zwłaszcza łączących modelowanie numeryczne, eksperyment i analizę danych. Z punktu widzenia recenzji kluczowe jest jednak to, że doktorant wykazał umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w ramach szerszego programu badawczego oraz potrafił zintegrować wyniki współautorskich publikacji w spójną rozprawę doktorską.

Podsumowując, cykl publikacji stanowiący rozprawę należy ocenić pozytywnie. Tworzy on logiczne i merytorycznie spójne osiągnięcie naukowe, a wskazane ograniczenia mają charakter dyskusyjny i nie podważają zasadniczej wartości rozprawy.

4. Uwagi merytoryczne i dyskusyjne

Przedstawione poniżej uwagi mają charakter merytoryczny i dyskusyjny. Wskazują kwestie wymagające doprecyzowania lub ostrożniejszej interpretacji, zwłaszcza w zakresie metodyki, walidacji i uogólniania wyników. Nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, lecz wynikają głównie ze złożoności analizowanych przepływów, niestacjonarnej aerodynamiki turbin VAWT oraz trudności modelowania przejścia laminarno-turbulentnego.

4.1. Uwagi zasadnicze

1. Ograniczeniem interpretacyjnym, powszechnym w środowisku inżynierskim, jest korelacyjny charakter modelu Transition SST, co wymaga ostrożnej analizy wyników predykcji w obszarach głębokiego oderwania aerodynamicznego, gdzie fizyka zjawisk separacyjnych ma silnie stochastyczny i nieliniowy charakter.
2. Część analiz wykonano w ujęciu dwuwymiarowym, podczas gdy wybrane zjawiska, takie jak rozwój bąbli separacyjnych, przeciągnięcie dynamiczne czy struktury wirowe w śladzie, mają w rzeczywistym przepływie charakter trójwymiarowy. Podejście 2D jest uzasadnione metodycznie, lecz ogranicza możliwość bezpośredniego przenoszenia części wniosków na rzeczywisty wirnik VAWT. Warto byłoby szerzej omówić wpływ braku tzw. ulgi

trójwymiarowej (3D relief) oraz zjawiska rozciągania wirów na potencjalne numeryczne przeszacowanie oscylacji sił aerodynamicznych i amplitudy histerezy w rozważanych modelach 2D.

3. W analizach numerycznych istotne znaczenie ma lokalna wartość intensywności turbulencji w pobliżu profilu lub wirnika, a nie wyłącznie wartość zadana na wlocie domeny. Zgodnie z konkluzjami płynącymi z analizy, na którą Autor wielokrotnie zwracał uwagę, istotne znaczenie interpretacyjne ma lokalna wartość intensywności turbulencji, kompensująca jej numeryczny zanik w długich domenach obliczeniowych, co należy uwzględnić przy interpretacji wyników dotyczących położenia przejścia, rozwoju bąbli separacyjnych i charakterystyk aerodynamicznych.
4. W analizach śladu aerodynamicznego, zwłaszcza przy zastosowaniu podejścia SAS, warto doprecyzować wpływ zagęszczenia siatki w obszarze wake. Zbyt mała rozdzielczość siatki lub nadmierne wygładzanie rozwiązania przez metodę numeryczną może prowadzić do tłumienia struktur wirowych w śladzie aerodynamicznym.
5. Badania profilu NACA 0018 przy bardzo niskich liczbach Reynoldsa są wartościowe, jednak ich wyniki ilościowe, zwłaszcza dotyczące oporu, wymagają ostrożnej interpretacji. Przy małym ciśnieniu dynamicznym istotne znaczenie mają dokładność przetworników, stosunek sygnału do szumu, możliwe drgania modelu, efekt blokady tunelu oraz sposób oszacowania niepewności pomiarowej.
6. Porównywanie wyników uzyskanych dla modeli wykonanych z różnych materiałów wymaga ostrożności interpretacyjnej, zwłaszcza gdy mogły one różnić się jakością powierzchni lub geometrią krawędzi spływu. Przy niskich liczbach Reynoldsa nawet niewielka chropowatość lub stępienie krawędzi spływu może wpływać na przejście, separację i opór aerodynamiczny.
7. Uproszczenia geometryczne modelu wirnika VAWT, takie jak pominięcie wału, ramion nośnych lub innych elementów konstrukcyjnych, mogą wpływać na zgodność wyników numerycznych z pomiarami śladu aerodynamicznego. Warto byłoby szerzej omówić, w jakim zakresie uproszczenia te mogły oddziaływać na interpretację uzyskanych wyników.
8. Analiza wpływu taśmy zigzag ma istotną wartość aplikacyjną, jednak jej rolę jako narzędzia eksperymentalnego wymuszającego przejście warto odróżnić od interpretacji jako odpowiednika rzeczywistej chropowatości lub zabrudzenia łopaty. Wnioski dotyczące wpływu taśmy na ślad aerodynamiczny wymagają dalszej weryfikacji dla innych geometrii, liczb Reynoldsa i poziomów turbulencji.

4.2. Uwagi szczegółowe

1. Z punktu widzenia układu typograficznego i kompozycji, cennym wzbogaceniem części syntetycznej byłoby zamieszczenie przekrojowej tabeli korelującej cele badawcze ze zrealizowanymi pomiarami.
2. W rozprawie przydatne byłoby bardziej konsekwentne ujednolicenie terminologii, symboli i oznaczeń stosowanych w części syntetycznej oraz w publikacjach wchodzących w skład cyklu. Dotyczy to zwłaszcza wielkości aerodynamicznych, oznaczeń modeli turbulencji oraz parametrów opisujących przejście laminarno-turbulentne. Jest to uwaga porządkująca, typowa dla rozpraw przygotowanych w formie cyklu publikacji.
3. Dla zwiększenia czytelności syntezy dorobku, wskazane byłoby jeszcze wyraźniejsze zaakcentowanie, poza formalnymi oświadczeniami, które etapy obliczeniowe (np. w generacji siatki lub post-processingu PIV) stanowiły wyłączny, samodzielny rezultat prac Doktoranta, a które czerpią z warsztatu zespołowego.
4. Kryteria identyfikacji położenia punktu przejścia, oparte m.in. na zmianach współczynnika tarcia powierzchniowego, mogłyby zostać szerzej uzasadnione fizycznie. Warto byłoby doprecyzować, w jakim zakresie przyjęte kryterium jest porównywalne z informacją wynikającą z pola intermitencji dostępnego w modelu przejścia.
5. W części dotyczącej profilu DU-91-W2-250 należy zachować precyzję interpretacyjną, ponieważ publikacja ta odnosi się do walidacji modelu przejścia przy wysokich liczbach Reynoldsa. Nie powinna być bezpośrednio utożsamiana z późniejszymi analizami prowadzonymi dla profilu NACA 0018 w zakresie niskich liczb Reynoldsa.
6. W przypadku porównań z wynikami uzyskanymi za pomocą programu XFOIL przydatne byłoby szersze omówienie ograniczeń tego narzędzia, zwłaszcza w odniesieniu do profili grubych, niskich liczb Reynoldsa oraz warunków, w których istotną rolę odgrywają laminarne bąble separacyjne.
7. Warto wyraźniej zasygnalizować w dyskusji syntetyzującej, które konkretnie wartości obciążeń współczynników aerodynamicznych obarczone są efektem skali, a które mają charakter zjawiska niezmiennego fizycznie.

Powyższe uwagi mają charakter szczegółowy i porządkujący. Nie podważają wartości merytorycznej rozprawy, lecz wskazują elementy, które mogłyby zwiększyć przejrzystość syntezy, ułatwić interpretację wyników i jeszcze wyraźniej pokazać wkład poszczególnych publikacji w rozwiązanie głównego problemu badawczego..

4.3. Pytania do doktoranta

1. W rozprawie szeroko wykorzystano model Transition SST do analizy przejścia laminarno-turbulentnego. Jakie są, zdaniem Doktoranta, najważniejsze ograniczenia tego modelu w zakresie bardzo niskich liczb Reynoldsa, np. $Re \approx 30\,000$? W jakich przypadkach modele w pełni turbulentne, np. oparte na $k-\omega$ SST, mogą mimo tych ograniczeń stanowić

akceptowalny kompromis między dokładnością a kosztem obliczeniowym w analizach VAWT?

2. Część analiz została przeprowadzona w ujęciu dwuwymiarowym, mimo że wybrane zjawiska, takie jak rozwój bąbli separacyjnych, przeciągnięcie dynamiczne czy struktury wirowe w śladzie, mają charakter trójwymiarowy. Które wnioski uzyskane w modelach 2D Doktorant uznaje za możliwe do przeniesienia na rzeczywisty wirnik Darrieusa, a które wymagają weryfikacji w modelach trójwymiarowych?
3. Badania profili przy bardzo niskich liczbach Reynoldsa i niskim poziomie turbulencji stawiają wysokie wymagania metrologiczne. Jakie, zdaniem Doktoranta, są kluczowe dobre praktyki eksperymentalne pozwalające ograniczyć wpływ małego ciśnienia dynamicznego, drgań modelu, chropowatości powierzchni oraz niedokładności wykonania modelu na wiarygodność uzyskanych wyników?
4. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem Actuator Line Model (ALM) oraz charakterystyk profili z taśmą turbulizującą typu zigzag wskazują na możliwość występowania asymetrii śladu aerodynamicznego. Jak Doktorant ocenia przydatność takich danych w projektowaniu rozmieszczenia turbin VAWT, np. w zastosowaniach miejskich, oraz w jakim zakresie metoda ta może być użyteczna w badaniach rozwojowych i walidacyjnych?
5. Pierwsza publikacja cyklu dotyczy profilu DU-91-W2-250 przy wysokich liczbach Reynoldsa, natomiast dalsze części rozprawy koncentrują się głównie na profilu NACA 0018, niskich liczbach Reynoldsa i turbinach VAWT. Jak Doktorant ocenia rolę tej pierwszej publikacji w budowaniu głównej tezy i spójności całego cyklu?

5. Podsumowanie oceny

Analiza rozprawy pozwala stwierdzić, że mgr inż. Jan Michna przedstawił opracowanie o wyraźnie określonym profilu badawczym, konsekwentnie rozwijanym w kolejnych publikacjach. Wartość pracy wynika przede wszystkim z krytycznej oceny przydatności wybranych metod numerycznych do opisu zjawisk trudnych do jednoznacznego modelowania, takich jak przejście laminarno-turbulentne, separacja laminarna i niestacjonarne obciążenia aerodynamiczne.

Na pozytywną ocenę zasługuje powiązanie zjawisk lokalnych, zachodzących w warstwie przyściennej profilu, z ich konsekwencjami dla pracy łopaty i całego wirnika. Autor stopniowo przechodzi od analiz profili aerodynamicznych, przez zagadnienia dynamiczne, do modelowania wirnika VAWT i wpływu wymuszonego przejścia na obciążenia oraz ślad aerodynamiczny. Taki układ wzmacnia spójność cyklu publikacji i pozwala uznać rozprawę za uporządkowane osiągnięcie naukowe.



5.1. Mocne strony rozprawy

Do najważniejszych mocnych stron rozprawy należy zaliczyć trafny wybór problemu badawczego, bardzo dobre osadzenie pracy w aktualnym stanie wiedzy oraz konsekwentne powiązanie zagadnień poznawczych z problemami praktycznymi modelowania turbin VAWT. Autor wykazał, że poprawne odwzorowanie przejścia laminarno-turbulentnego i laminarnych bąbli separacyjnych ma istotne znaczenie dla predykcji charakterystyk aerodynamicznych profili i łopat wirnika.

Istotną zaletą pracy jest szeroki warsztat badawczy. Autor wykorzystał różne poziomy modelowania numerycznego, obejmujące m.in. podejście URANS, model Transition SST, klasyczny model SST, podejście SAS oraz modele uproszczone stosowane w analizie wirników. Pozytywnie należy ocenić również uwzględnienie danych eksperymentalnych i walidacyjnych, co wzmacnia wiarygodność prowadzonych analiz.

Mocną stroną rozprawy jest także krytyczne podejście do stosowanych narzędzi. Autor nie ograniczył się do przedstawienia wyników obliczeń, ale wskazał także ograniczenia modeli turbulencji i przejścia, zwłaszcza w zakresie niskich liczb Reynoldsa, przepływów separacyjnych i warunków silnie niestacjonarnych. Taka postawa świadczy o dojrzałości naukowej i świadomości metodologicznej.

5.2. Najważniejsze osiągnięcia naukowe

Za najważniejsze osiągnięcia naukowe rozprawy należy uznać systematyczną ocenę wpływu przejścia laminarno-turbulentnego oraz laminarnych bąbli separacyjnych na charakterystyki aerodynamiczne profili i wirników VAWT. Praca pokazuje, że pominięcie tych zjawisk lub zastąpienie ich modelem w pełni turbulentnym może prowadzić do istotnego uproszczenia opisu przepływu i błędnej interpretacji obciążeń aerodynamicznych.

Ważnym osiągnięciem jest ocena możliwości i ograniczeń modelu Transition SST w analizie przepływów wokół profili stosowanych w turbinach VAWT. Autor wykazał, że model ten może być użyteczny, ale jego wyniki wymagają ostrożnej interpretacji, zwłaszcza przy większych kątach natarcia, w zakresie silnej separacji i dla bardzo niskich liczb Reynoldsa.

Na podkreślenie zasługuje również analiza wpływu taśmy turbulizacyjnej na charakterystyki profilu, obciążenia łopat i ślad aerodynamiczny. Wyniki te mają znaczenie zarówno naukowe, jak i praktyczne, ponieważ wskazują, że wymuszenie przejścia w badaniach tunelowych może zmieniać nie tylko lokalne charakterystyki aerodynamiczne, lecz również globalny obraz pracy wirnika.

Istotnym elementem wkładu naukowego jest także rozwój i zastosowanie procedur estymacji lokalnego kąta natarcia łopat wirnika VAWT. Jest to zagadnienie trudne, ponieważ lokalny kąt natarcia zależy od ruchu obrotowego, prędkości napływu, wpływu śladu aerodynamicznego i efektów dynamicznych. Wyniki w tym zakresie wzmacniają metodyczny charakter rozprawy.

5.3. Ograniczenia pracy

Wskazane w recenzji ograniczenia nie podważają pozytywnej oceny rozprawy, ale powinny zostać uwzględnione przy interpretacji jej wyników. Najważniejsze z nich dotyczą szerokiego wykorzystania modeli opartych na podejściu RANS/URANS. Model Transition SST, choć uzasadniony i użyteczny, ma charakter korelacyjny, dlatego nie opisuje bezpośrednio pełnej fizyki przejścia laminarno-turbulentnego.

Drugim istotnym ograniczeniem jest wykorzystanie modeli dwuwymiarowych do analizy zjawisk, które w rzeczywistości mają charakter trójwymiarowy. Dotyczy to zwłaszcza przeciągnięcia dynamicznego, pękania bąbli separacyjnych, struktur wirowych w śladzie aerodynamicznym oraz efektów końcowych łopat. W konsekwencji część wyników należy interpretować z uwzględnieniem ograniczeń przyjętych modeli numerycznych. Otrzymane rezultaty dobrze pokazują tendencje i zależności właściwe dla zastosowanego poziomu modelowania, lecz nie stanowią pełnego odwzorowania wszystkich zjawisk występujących w rzeczywistym, trójwymiarowym przepływie wokół wirnika VAWT.

Ograniczenia dotyczą również części eksperymentalnej, zwłaszcza pomiarów przy bardzo niskich liczbach Reynoldsa. Małe wartości ciśnienia dynamicznego, możliwy wpływ drgań, chropowatości powierzchni, geometrii krawędzi spływu i efektu blokady tunelu mogły wpływać na dokładność ilościową części wyników. W pracy przydatne byłoby szersze omówienie niepewności pomiarowej.

Pewnym ograniczeniem formalnym jest także brak bardzo syntetycznego zestawienia łączącego publikacje z hipotezami, metodami, wynikami i wkładem doktoranta. Nie obniża to wartości merytorycznej pracy, ale utrudnia czytelnikowi szybkie uchwycenie struktury osiągnięcia naukowego.

5.4. Ocena spełnienia wymagań ustawowych

Na podstawie przedłożonej rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, ponieważ w sposób systematyczny analizuje wpływ przejścia laminarno-turbulentnego i laminarnych bąbli separacyjnych na aerodynamikę profili oraz wirników VAWT, a także ocenia możliwości i ograniczenia stosowanych w tym zakresie metod CFD.

Rozprawa potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, zwłaszcza w obszarze mechaniki płynów, aerodynamiki, metod numerycznych i interpretacji badań eksperymentalnych. Autor wykazał znajomość aktualnej literatury, zdolność identyfikacji luk badawczych oraz umiejętność krytycznego wykorzystania narzędzi obliczeniowych.

Praca potwierdza również umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Świadczy o tym sposób sformułowania problemu badawczego, dobór metod, realizacja badań,

interpretacja wyników oraz przygotowanie spójnej syntezy cyklu publikacji. Pomimo wskazanych ograniczeń, rozprawa ma wyraźną wartość naukową i aplikacyjną.

W konsekwencji oceniam rozprawę doktorską mgr. inż. Jana Michny pozytywnie i uznaję, że spełnia ona wymagania określone dla rozpraw doktorskich w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

6. wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę aktualność i znaczenie podjętej problematyki, zakres przeprowadzonych badań, poziom zastosowanej metodyki numerycznej i eksperymentalnej, spójność przedstawionego cyklu publikacji oraz oryginalność uzyskanych wyników, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jana Michny pt. „Modelling of laminar-to-turbulent transition and laminar separation bubbles using Computational Fluid Dynamics methods in the case of aerodynamic analysis of a laboratory-scale Vertical-Axis Wind Turbine” spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Jana Michny do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.