

Częstochowa, 18.03.2021

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bogusławski  
Katedra Maszyn Ciepłych  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki  
Politechnika Częstochowska

**Ocena osiągnięcia naukowego zatytułowanego  
„Modelowanie siłowni wiatrowych o pionowej osi obrotu wykorzystując  
metody numeryczne mechaniki płynów”  
oraz aktywności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej  
doktora inżyniera Krzysztofa Rogowskiego  
ubiegającego się o stopień doktora habilitowanego**

Przedstawiona ocena została opracowana na podstawie następujących dokumentów dostarczonych przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej Prof. dr. hab. inż. Roberta Sitnika:

- kopii dyplomu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika,
- autoreferatu w języku polskim i angielskim,
- cyklu artykułów naukowych powiązanych tematycznie pt. „Modelowanie siłowni wiatrowych o pionowej osi obrotu wykorzystując metody numeryczne mechaniki płynów”,
- wykazu opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacji o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki w języku polskim i angielskim.

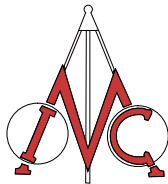
## **1. CHARAKTERYSTYKA SYLWETKI NAUKOWEJ HABILITANTA**

### **1.1. WYKSZTAŁCENIE, PRZEBIEG PRACY ZAWODOWEJ**

Kandydat ukończył studia magisterskie w roku 2008 na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał broniąc w roku 2014 rozprawę pt.: „Analysis of Performance of the Darrieus Wind Turbines ” na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Promotorem rozprawy był dr hab. inż. Ryszard Maroński, prof. PW. Przez cały okres swej działalności zawodowej Habilitant był i nadal jest związany z Instytutem Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej.

### **1.2. BADANIA I DOROBEK PUBLIKACYJNY**

Tematyka prac badawczych, którymi w głównej mierze zajmował się Habilitant od czasu uzyskania stopnia doktora w roku 2014 dotyczy matematycznego modelowania siłowni wiatrowych. Habilitant jest współautorem 8. publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Report (JCR), dwóch publikacji w czasopismach spoza listy JCR oraz dwóch publikacji w materiałach pokonferencyjnych na temat modelowania turbin wiatrowych.



Liczba cytowań publikacji Habilitanta, bez autocytowań, oraz indeks H według bazy Web of Science wynoszą odpowiednio 49 i 5.

### 1.3. UZNANIE W ŚRODOWISKU NAUKOWYM

Habilitant jest rozpoznawalny w krajowym i międzynarodowym środowisku naukowym, czego dowodem są liczne recenzje publikacji w czasopismach o zasięgu międzynarodowym oraz rola współwydawcy specjalnego numeru pt.: "Advancement in Computational Fluid Mechanics and Optimization Methods" w piśmie Processes. Był również kilkakrotnie członkiem komitetu organizacyjnego konferencji Mechanika w Lotnictwie. Habilitant ściśle współpracuje z zespołem z Uniwersytetu Technicznego Danii, czego efektem są wspólne publikacje.

### 1.4 . FUNDUSZE BADAWCZE, KIEROWANIE ZESPOŁAMI BADAWCZYMI

W roku 2019 Habilitant uzyskał finansowanie w ramach konkursu Miniatura Narodowego Centrum Nauki, które pozwoliło na realizację wyjazdu konsultacyjnego do Uniwersytetu Technicznego Danii. Był również podwykonawcą grantu POIG finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

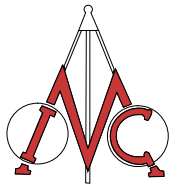
### 1.5. OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE I ORGANIZACYJNE

Habilitant był wykonawcą w projekcie „NERW PW Nauka-Edukacja-Rozwój-Współpraca” (POWR), w ramach którego opracował dwa kursy: Drgania w przemyśle oraz Energetyka wiatrowa szansą dla polskiego przemysłu. Od początku zatrudnienia w Politechnice Warszawskiej prowadził wykłady, ćwiczenia audytoryjne i laboratoryjne z następujących przedmiotów: drgania, mechanika, mechanika analityczna, mechanika lotu, siłownie wiatrowe. Był promotorem 11. prac dyplomowych (inżynierskich i magisterskich) głównie z zakresu problematyki siłowni wiatrowych, z których 4 znalazły się w finałach Ogólnopolskiego Konkursu o Dyplom i Nagrodę Prezesa Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP). Jest obecnie promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim.

## 2. OCENA OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Osiągnięciem naukowym przedstawionym do oceny jest cykl publikacji dotyczących modelowania matematycznego siłowni wiatrowych o pionowej osi wirnika. Habilitant koncentruje się na analizie aerodynamiki turbiny Darrieusa o średniej mocy. Turbiny tego typu charakteryzują się niskim poziomem hałasu, niskimi kosztami produkcji oraz niezależnością ich pracy od kierunku wiatru. Cechy te decydują o możliwościach ich praktycznych zastosowań, co świadczy o aktualności i istotności prac badawczych wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

W skład cyklu publikacji wchodzi 8 artykułów w czasopismach z listy JCR, z których 4 to prace samodzielne Habilitanta, a pozostałe to prace współautorskie. W 3. publikacjach współautorskich Habilitant jest pierwszym autorem, a jego udział jest co najmniej 60%. W jednej, współautorskiej publikacji Habilitant deklaruje 10% udziału, co w żadnym stopniu nie obniża rangi tego osiągnięcia, ponieważ praca dotyczy dużego projektu badawczego i świadczy o międzynarodowym uznaniu osiągnięć Habilitanta oraz jego zdolności do pracy w dużych, międzynarodowych zespołach badawczych. Osiągnięcie naukowe uzupełnione jest dwoma publikacjami w czasopismach spoza listy JCR oraz dwoma publikacjami pokonferencyjnymi opublikowanymi w piśmie Journal of Physics indeksowanym w bazie WoS.



Chronologicznie pierwszą pracą w cyklu jest publikacja [8] (numeracja publikacji wg spisu publikacji) z roku 2015 poświęcona modelowaniu turbiny Savoniusa, w której przedstawiono badania parametryczne tego typu turbiny w zależności od wyróżnika szybkoobrotowości, szerokości szczeliny pomiędzy łopatkami i liczby Reynoldsa. Publikacja pokazuje użyteczność, stosunkowo prostego, dwuwymiarowego modelu numerycznego w pracach projektowych i optymalizacyjnych turbiny Savoniusa. Kolejne prace dotyczą badań turbiny Darrieusa. W pracy [11] Habilitant podejmuje ambitną próbę wykonania trójwymiarowych obliczeń przy pomocy metody SAS-Scale Adaptive Simulation i porównania z trój- oraz dwuwymiarowymi modelami URANS. Wnioski nie są jednoznaczne, ponieważ metoda SAS, w przypadku trójwymiarowym, pozwala wprowadzić na odtworzenie znacznie bardziej złożonego pola prędkości za wirnikiem, to jednak wyniki nie są wyraźnie lepsze w porównaniu z danymi eksperymentalnymi nawet w odniesieniu do dwuwymiarowego modelu URANS. Zagadnienie jest jednak bardzo złożone, a praca jest przykładem jednych z pierwszych trójwymiarowych symulacji typu LES-Large Eddy Simulation dla turbiny Darrieusa i zapewne wymaga kontynuacji. Możliwe, że ten brak wyraźnej przewagi modelu trójwymiarowego nad podejściem dwuwymiarowym wpłynął na dalszy tok prac badawczych Habilitanta, w którym przedmiotem badań był dwuwymiarowy model numeryczny siłowni wiatrowej Darrieusa, jego weryfikacja oraz walidacja w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych. Przykładem takich badań jest praca [9], w której przedstawiono analizę parametrów pracy turbiny, pola prędkości i ciśnienia w funkcji wyróżnika szybkoobrotowości. Jednym z wniosków z tych badań jest wskazanie użyteczności opracowania uproszczonego modelu aerodynamiki turbin tego typu na potrzeby prac projektowych. W kolejnej pracy [6] przedstawiono symulacje numeryczne w warunkach ustalonych oraz nieustalonych, których celem była analiza wpływu kąta natarcia na siłę nośną oraz siłę oporu dla łopatki o profilu NACA. Wyniki obliczeń porównano z wynikami badań eksperymentalnych, pokazując zadowalającą zgodność. W pracy tej wykorzystano dwa różne modele turbulencji SST-transition oraz k- $\epsilon$ , wskazując na pewne ilościowe różnice wynikające z wyboru modelu turbulencji. Interesującym elementem tych badań było podjęcie próby modelowania przejścia laminarno-turbulentnego na łopatkę turbiny przy wykorzystaniu równania transportu intermitencji. Autor pokazał, że uwzględnienie przejścia laminarno-turbulentnego poprawia oszacowanie współczynników siły aerodynamicznej, nie analizując jednak głębiej wpływu modelu turbulencji na pole przepływu w bliskim sąsiedztwie łopatki, ograniczając się do oceny wpływu modelu na globalne parametry pracy łopatki. Problem wyboru modelu turbulencji analizowany jest w kilku pracach. Informacja o ilościowych różnicach wynikających z wyboru modelu turbulencji ma wartość dla prac inżynierskich, ponieważ pozwala oszacować, z jakim poziomem błędu należy się liczyć przy zmianie modelu turbulencji. W pracy naukowej ograniczenie się do takiej informacji nie jest jednak wystarczające, a wyniki badań powinny być uzupełnione o analizę pól przepływów uzyskanych przy pomocy różnych modeli oraz dyskusję jakości modeli z punktu widzenia fizyki przepływu. Tematyka doboru modelu turbulencji kontynuowana jest w pracy [5]. W tym przypadku analizowane są, podobnie jak poprzednio, dwa modele: SST i k- $\epsilon$ , wskazując na ilościowe różnice uzyskane przy użyciu tych modeli, bez głębszej analizy przyczyn tych różnic. W pracy tej zastosowano również trzecie podejście, które Autor niepoprawnie nazywa modelem laminarnym, bo analizowany przepływ jest z pewnością przepływem turbulentnym. Podejście to należy nazwać metodą bezpośrednią DNS-Direct Numerical Simulation, w której nie zastosowano żadnego modelu turbulencji, ponieważ siatka powinna być na tyle gęsta, że rozwiązanie obejmuje wszystkie skale przepływu turbulentnego. W takiej sytuacji jednak konieczne byłoby wykonanie obliczeń trójwymiarowych, ponieważ chwilowe pole prędkości w



przepływie turbulentnym jest zawsze polem niestacjonarnym oraz trójwymiarowym. Opis „modelu laminarnego” oraz wyników uzyskanych przy jego pomocy wydają się w tej pracy bardzo powierzchowne. W pracy tej przeanalizowano również wpływ jaki może mieć niedokładność montażu łopatki na jej obciążenia aerodynamiczne, co jest istotną informacją w świetle porównania wyników symulacji numerycznych z badaniami eksperymentalnymi. Podobnie jak w poprzednich pracach, porównano wyniki obliczeń uzyskanych dla dwóch modeli turbulencji i niestety podobnie jak poprzednio porównanie to wnosi niewiele nowego w zakresie modelowania turbulencji w przepływach wokół wirników turbin wiatrowych. Kolejnym istotnym zagadnieniem, z inżynierskiego punktu widzenia, podjętym przez Habilitanta była analiza wpływu wału turbiny na jej osiągi oraz określenie nieustalonego obciążenia aerodynamicznego samego wału, przedstawione w prasy [3]. To ważne zagadnienia i wskazówki dla projektantów tego typu turbin. Analiza wpływu grubości łopatek oraz stopnia ich wygięcia dla łopatek o profilu NACA były tematem kolejnej pracy [2]. Ilościowe wyniki uzyskane w tej pracy mogą być wykorzystane w dalszych projektach turbin wiatrowych. Pracę [1] można uznać za pewnego rodzaju podsumowanie wcześniejszych badań oraz uznanie osiągnięć Autora w międzynarodowym środowisku naukowym. Wyniki badań Habilitanta zostały włączone do dużego projektu badawczego, w ramach którego przeprowadzono obliczenia dla trzech przypadków testowych turbin Darrieusa typu H o różnych parametrach. Obliczenia prowadzono przy pomocy różnych programów komputerowych i różnych metod obliczeniowej mechaniki płynów, a ich wyniki porównano z wynikami badań eksperymentalnych oraz wynikami uproszczonych modeli inżynierskich. Wnioski z tych badań stanowią walidację metod obliczeniowej mechaniki płynów w modelowaniu turbin typu Darrieusa oraz pokazują zakres zastosowań uproszczonych modeli inżynierskich. Pracę tę należy uznać za ważny element ocenianego osiągnięcia naukowego i dowód uznania dla Habilitanta w międzynarodowym środowisku naukowym oraz umiejętności pracy w dużych zespołach badawczych.

Badania Habilitanta wskazują na złożoność zjawisk przepływowych w turbinach wiatrowych, które wymagają stosowania zaawansowanych modeli matematycznych wymagających dużych mocy obliczeniowych oraz czasu komputerowego. W praktycznych zastosowaniach ważne jest modelowanie nie tylko jednej turbiny wiatrowej, ale często całych farm wiatrowych, w których konieczne jest uwzględnienie oddziaływania pomiędzy poszczególnymi turbinami. Oczywiście w takim przypadku koszty obliczeniowe będą wielokrotnie wyższe, co praktycznie uniemożliwia zastosowanie tego typu modelowania w praktyce inżynierskiej. Bardzo wartościowy jest zatem kolejny nurt podjęty przez Habilitanta, w pracach [7,10,12], budowy efektywnego, uproszczonego modelu, zgodnie z którym łopaty wirnika zastąpione są siłami aerodynamicznymi w równaniach Naviera-Stokesa. Metoda ta nazwana przez Autora ACM-Actuator Cell Model może w przyszłości mieć praktyczne znaczenie w projektowaniu turbin oraz farm turbin wiatrowych. Podkreślić jednak należy, że efektywność takiego uproszczonego modelu zależy od stopnia zrozumienia fizyki przepływu wokół łopatki turbiny, w różnych reżimach jej pracy, co pozwoli na precyzyjne zdefiniowanie źródeł pędu dla modelu ACM.

Podsumowując, przedstawiony do oceny cykl publikacji na temat modelowania siłowni wiatrowych o pionowej osi obrotu stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe, które wnosi istotny wkład w rozwój metod obliczeniowych w zastosowaniach inżynierskich, pozwala na lepsze zrozumienie aerodynamiki turbin wiatrowych oraz kierunku ich rozwoju oraz optymalizacji. Uwagi krytyczne dotyczące nieco powierzchownej analizy fizyki modelowanego przepływu, nie obniżają



rangi naukowej osiągnięcia, a ich celem jest zwrócenie uwagi Autora na istotne elementy pracy badawczej, które powinny być uwzględnione w Jego dalszych pracach.

### 3. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Habilitant wykorzystuje model przepływu nieustalonego oraz równania RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations) wraz z dwurównaniowymi modelami turbulencji  $k-\epsilon$  oraz SST. Dobór i ocena modelu turbulencji w modelowaniu turbin wiatrowych o pionowej osi wirnika są podkreślane jako istotne elementy osiągnięcia naukowego. Jednak zarówno w publikacjach jak i w autoreferacie trudno znaleźć argumentację dla wyboru tych dwóch modeli. Można się domyślać, że wybór wynikał z faktu, że te właśnie modele są dość powszechnie wykorzystywane w przemysłowych obliczeniach wykorzystujących metody numeryczne mechaniki płynów. Charakterystyka tych modeli w konkretnym zastosowaniu do modelowania turbin wiatrowych typu Darrieusa ma wartość praktyczną i może być cenną wskazówką dla osób zajmujących się projektowaniem i optymalizacją turbin tego typu. Pewnym niedostatkim ocenianego cyklu publikacji jest jednak brak głębszej analizy funkcjonowania wybranych modeli turbulencji z punktu widzenia fizyki przepływu wokół łopatki turbiny. Zjawiska, które występują w tego typu przepływie są bardzo złożone ze względu na silną niestacjonarność przepływu, zmianę kąta natarcia, interakcję z własnym śladem oraz śladami innych łopatek, przejście laminarno-turbulentne, oderwanie warstwy przyściennej. Wszystkie te zjawiska są analizowane w publikacjach, z punktu widzenia analizy modelu turbulencji brakuje jednak próby wskazania, które z tych zjawisk wpływają na lepsze lub gorsze efekty zastosowania danego modelu turbulencji. Próba zastosowania metody DNS-Direct Numerical Simulation w modelu dwuwymiarowym również nie została uzasadniona w sposób wystarczający, a interpretacja uzyskanych wyników jest raczej powierzchowna.

### 4. OCENA ISTOTNEJ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ

Habilitant od czasu uzyskania stopnia doktora prowadzi bardzo aktywną działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną. Legitymuje się istotnym dorobkiem publikacyjnym, którego parametry bibliometryczne są wystarczające do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Jest uznanym ekspertem w międzynarodowym środowisku naukowym, czego dowodem są wspólne publikacje oraz praca w międzynarodowych zespołach badawczych. Dwukrotnie odbył naukowe staże zagraniczne. Był członkiem komitetów organizacyjnych ważnych konferencji naukowych. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej oraz Stowarzyszenia Inżynierii Wiatrowej. Był kierownikiem i wykonawcą projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki oraz Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

### 5. WNIOSEK KOŃCOWY

Prace badawcze dr. inż. Krzysztofa Rogowskiego wnoszą istotny wkład do rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna, w szczególności w zakresie badań i konstrukcji siłowni wiatrowych. Przedstawione osiągnięcia naukowe, dorobek publikacyjny, działalność dydaktyczna i organizacyjna uprawniają Go w zupełności do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

**Podsumowując, stwierdzam, że spełnione są ustawowe warunki wymagane do dopuszczenia dr. inż. Krzysztofa Rogowskiego do dalszych etapów postępowania habilitacyjnego i wnioskuje o takie dopuszczenie.**