

Prof. dr hab. inż. Artur TYLISZCZAK
Katedra Maszyn Ciepłych
Politechnika Częstochowska

Al. Armii Krajowej 21

42-201 Częstochowa

tel.: (034) 3250505; fax: (034) 3250555

e-mail: artur.tyliszczak@pcz.pl

Częstochowa, 05.08.2026

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jana Michny:
„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”

Recenzja została opracowana na zlecenie RND Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej zawarte w skierowanym do mnie piśmie od dr. hab. inż. Marka Wojtyry, prof. uczelni z dnia 18 marca 2026r.

1. Ocena ogólna.

Tematyka pracy dotyczy numerycznego modelowania przepływu (CFD) wokół turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu typu Darrieusa ze szczególnym naciskiem na modelowanie przepływu wokół łopat turbinowych. W pracy wykorzystywano komercyjne oprogramowanie ANSYS jako główne narzędzie badawcze oraz programy FLOWer and STAR-CCM+ w celach porównawczych dla wybranych przypadków testowych. Udział doktoranta w badaniach eksperymentalnych i/lub ich opracowaniu stanowił uzupełnienie prac związanych z modelowaniem CFD. Celem pracy doktorskiej była ocena przydatności podejścia unsteady RANS do modelowania silnie niestacjonarnego pola przepływu w sąsiedztwie łopat turbinowych oraz analiza jego dynamiki w różnych warunkach przepływowych dla wybranych konfiguracji turbin i łopat. **W mojej ocenie temat pracy i użyte w niej metody analizy rozpatrywanych zagadnień pozwalają zakwalifikować ją do dyscypliny inżynieria mechaniczna.** Dyskusja uzyskanych wyników oraz ich prezentacja i weryfikacja za pomocą dostępnych danych eksperymentalnych są prawidłowe. **Praca jest oryginalna i reprezentuje stopień złożoności zwyczajowo spotykany w pracach doktorskich.** Zastosowane metody są nowoczesne i odpowiednie do analizowanych zagadnień.

2. Ocena szczegółowa.

Praca została napisana w języku angielskim dzięki czemu może służyć jako pomoc naukowa szerokiemu gronu naukowców. Układ pracy **nie jest typowy** w porównaniu do większości dotychczas recenzowanych przeze mnie prac doktorskich. Zasadnicza jej część składa się z krótkiego wprowadzenia i zwięzłego opisu siedmiu współautorskich publikacji doktoranta (czterokrotnie pierwszy autor) stanowiących bazę ocenianej pracy doktorskiej. Trzy z nich ukazały się w czasopiśmie Energies (MDPI, 140 pkt. MNiSW), jedna w czasopiśmie Processes



(MDPI, 100 pkt. MNiSW), dwie w czasopiśmie Advances in Science and Technology Research Journal wydawanym przez Politechnikę Lubelską (100 pkt. MNiSW) oraz jednej publikacji w czasopiśmie Energy (Elsevier, 200 pkt. MNiSW). W oryginalnej postaci, tj. takiej jak opublikowanej przez czasopisma, publikacje te zamieszczono w dalszej części pracy, w której dodatkowo uwzględniono trzy publikacje do których doktorant nie odnosi się w części zasadniczej pracy. Uzupełnienie stanowi potwierdzenie przez współautorów wkładu doktoranta w powstanie poszczególnych publikacji. Biorąc pod uwagę, że wszystkie przedstawione publikacje ukazały się w czasopismach wyszczególnionych na tzw. liście ministerialnej rola recenzenta jest ułatwiona. Mam tutaj na myśli to, że nie wypada kwestionować wyników badań i publikacji już raz ocenionych i zaakceptowanych przez ekspertów w dziedzinie, której praca doktorska dotyczy. Zakładam, że proces recenzji publikacji przebiegał rzetelnie z dochowaniem wysokich naukowych standardów. W przypadku MDPI, na bazie własnych doświadczeń uważam jednak, że proces recenzji odbiega od tego mającego miejsce w wydawnictwach takich jak ELSEVIER, Taylor & Francis itp. Z tego względu, publikacjom w czasopismach Energies i Processes poświęciłem więcej uwagi.

Generalnie, ocenę pracy ułatwia struktura wprowadzenia, w którym doktorant w jawny i klarowny sposób definiuje zagadnienia i obszary badań wymagające uzupełnienia określając je jako „research gaps” (9 pozycji). W mojej ocenie, część z tych zagadnień jest wspólna dla większości problemów przepływowych, np. wpływ liczby Reynoldsa i intensywności turbulencji, zakres stosowalności modeli RANS czy też poprawność symulacji 2D w świetle trójwymiarowej struktury przepływu. W kolejnej części wprowadzenia doktorant przedstawia 3 hipotezy badawcze oraz definiuje zagadnienia testowe (15 pozycji), za pomocą których zamierza udowodnić poprawność sformułowanych hipotez. Omawiając publikacje w zasadniczej części pracy doktorant odnosi się bezpośrednio do tych zagadnień jak i do uprzednio zdefiniowanych „research gaps”. W mojej ocenie, tego typu struktura pracy polegająca na przypisaniu zagadnień do poszczególnych publikacji jest doskonałym pomysłem. Podsumowując układ pracy, zastanawiające jest umiejscowienie rozdziału 1.5 Thesis structure. Uważam, że powinien on znaleźć się na początku wprowadzenia lub przed nim, a nie na końcu wprowadzenia.

W ocenianej pracy, publikacje traktowane są jako niepowiązane ze sobą pozycje niestanowiące całości, tzn. brak którejkolwiek z nich nie wyklucza powstania pozostałych. Z tego zapewne względu, w części opisowej doktorant odnosi się indywidualnie do każdej publikacji. Z edytorskiego punktu widzenia za niewłaściwe uważam wielokrotne objaśnianie skrótów VAWT, RANS itp. Wystarczyło to zrobić jeden raz w trakcie omawiania wyników pierwszej publikacji, a przy opisie kolejnych posługiwać się wyłącznie skrótami. Czy jest jakiś powód, dla którego tak nie postąpiono?

Tematyka wszystkich publikacji jest zbliżona i dotyczy VAWT jako kompletnej turbiny lub jej łopat. Struktura publikacji też jest zbliżona i obejmuje weryfikację modelu obliczeniowego oraz aspekty fizyczne. Ze względu na stopień skomplikowania przepływu i jego niestacjonarność wymuszającą prowadzenie symulacji obejmujących wiele obrotów turbiny i czasowe uśrednianie wyników, stosowanie metod symulacji typu LES i DNS jest niewykonalne w ramach czasowych akceptowalnych z inżynierskiego punktu widzenia. W pełni zgadzam się z doktorantem, że przy obecnie istniejących mocach obliczeniowych podejście typu RANS jest jedyną opcją. Kluczowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań są następujące.



Analizując $dC_L/d\alpha$ stwierdzono na podstawie Fig. 2.2, że różnice są niewielkie. Nie jestem w stanie tego ocenić na podstawie danych na Fig. 2.2.

Na stronie 8 publikacji, w sekcji 3.5. *Verification of the Length of Time Step*, podano, że krok czasowy wynosił $\Delta t = 6 \times 10^{-6} s$. Jednocześnie podano, że liczba Couranta była założona 200. Podejrzanie to wygląda. Przecież definiuje się albo krok czasowy albo liczbę Couranta, na podstawie której jest on wyznaczany, ale nie dwa parametry jednocześnie. Proszę o wyjaśnienie.

W publikacji nr 2 „Numerical Study of the Effect of the Reynolds Number and the Turbulence Intensity on the Performance of the NACA 0018 Airfoil at the Low Reynolds Number Regime” (Processes) analizowano opływ wokół symetrycznego profile NACA 0018. Proszę o informację jaki fizyczny mechanizm powoduje skokową zmianę C_P (Fig. 2.8) dla większych kątów natarcia.

W opisie publikacji nr 3 „Aerodynamic performance analysis of NACA 0018 airfoil at low Reynolds numbers in a low-turbulence wind tunnel” (ASTRJ), na podstawie Fig 2.10 stwierdzono, że “The lift coefficient can have non-zero value for zero angle of attack.” z czym się absolutnie nie zgadzam, oraz że “For a tiny positive angle of attack, the negative values were measured.” co w mojej ocenie jest wyłącznie wynikiem błędu pomiarowego.

W publikacji nr 4 „The Harmonic Pitching NACA 0018 Airfoil in Low Reynolds Number Flow” analizowano wpływ okresowej zmienności kąta natarcia na dynamikę przepływu o raz współczynniki siły nośnej i oporu. W zakresie małych kątów natarcia zmienność C_L jest liniowa. Czy obserwowana chwilowa zmienność C_L jest proporcjonalna do zmienności amplitudy fluktuacji kąta natarcia? Czy odpowiada ona statycznej zmianie C_L w funkcji kąta natarcia?

W publikacji nr 5 „Numerical Analysis of Aerodynamic Performance of a Fixed-Pitch Vertical Axis Wind Turbine Rotor” analizowano wpływ zmiany kąta nachylenia łopat w zakresie $\theta = \pm 10 \text{ deg}$ turbiny typu H z dwiema łopatom. Między innymi stwierdzono, że zdecydowanie lepsze osiągi uzyskuje się w przypadku dodatniego nachylenia łopaty ($\theta = 10 \text{ deg}$). Proszę o próbę identyfikacji fizycznego mechanizmu stojącego za tym wnioskiem.

W publikacji nr 7 „Impact of zigzag tape on blade loads and aerodynamic wake in a vertical axis wind turbine: A Delft VAWT case study” badano wpływ chropowatości powierzchni na pole przepływu i osiągane parametry. W mojej ocenie jest to najbardziej wartościowa praca ze wszystkich przedstawionych przez doktoranta do oceny. Zastanawia mnie, dlaczego porównując wyniki uzyskane dla profili gładkiego i chropowatego odnoszono się do rozwiązań chwilowych, Fig. 3.14-3.15. Przecież różnice w wynikach pomiędzy innymi chwilami czasu mogą być podobne do tych istniejących pomiędzy różnymi konfiguracjami łopat, tj. gładkiej i chropowatej. Proszę o wyjaśnienie.

Pracę kończy podsumowanie, w którym doktorant odnosi się do uprzednio zdefiniowanych hipotez i metodyki ich udowodnienia. Jest to zrobione w przejrzysty i jasny sposób, wraz z odwoływaniami do poszczególnych fragmentów pracy.

Elementami, których w pracy brakuje, przynajmniej w części opisowej, to brak definicji modelu obliczeniowego, tj. równań Naviera-Stokesa oraz równań modelu Transition SST, szczegółów

AS.

Wykorzystanie RANS do modelowania przepływów przy niskiej liczbie Reynoldsa, w których charakter przepływu się zmienia, występuje przejście laminarno-turbulentne oraz pojawiają się pęcherze oderwania wymaga stosowania zaawansowanego modelu dedykowanego do symulacji tego typu zjawisk. W pracy pokazano, że najlepiej pod tym kątem sprawuje się model Transition SST ($\gamma - Re_\theta$). Wyniki uzyskiwane za jego pomocą okazały się istotnie lepsze niż w przypadku stosowania klasycznych modeli RANS, np. $k - \omega, k - \epsilon$. W niektórych konfiguracjach różnice pomiędzy rozwiązaniami uzyskiwanymi za pomocą różnych modeli były większe niż te wynikające ze zmiany kąta natarcia łopatki turbiny lub liczby Reynoldsa. Z praktycznego punktu widzenia taka sytuacja nie może być zaakceptowana i to właśnie stanowi w mojej ocenie zasadniczą motywację do prowadzenia badań podjętych w pracy. Pod kątem fizycznym, najciekawsze wyniki i sformułowane wnioski dotyczą wg mnie wpływu liczby Reynoldsa i intensywności turbulencji (Ti) oraz zastosowania chropowatości typu „zigzag” w celu sterowania przebiegiem współczynnika siły nośnej, jego maksymalnymi wartościami oraz punktem oderwania warstwy przyściennej. Wykazano, że wpływ zmienności liczby Reynoldsa jest zauważalny wyłącznie w zakresie jej niskich wartości. Z mojego doświadczenia mogę stwierdzić, że podobna prawidłowość istnieje w innego typu przepływach, np. w strugach swobodnych. Analizując wpływ intensywności turbulencji zaobserwowano, że zwiększenie wlotowej wartości Ti nie ma istotnego wpływu na poziom Ti w sąsiedztwie krawędzi natarcia, gdzie Ti osiąga około 0.5%. Sądzę, że kluczowym parametrem decydującym o poziomie Ti jest nie tylko jej bezwzględna wartość wlotowa, ale również czasowo-przestrzenna długość struktur turbulentnych. Czy doktorant zgadza się z tą opinią? Czy wpływ długości skal czasowo-przestrzennych był szczegółowo analizowany? Być może przeoczyłem tę informację. Badania mające na celu wpływ chropowatości powierzchni pokazały między innymi, że chropowatość typu „zigzag” linearyzuje profil współczynnika siły nośnej nie obniżając jego maksymalnej wartości. Poniżej przedstawiam moje spostrzeżenia i pytania, które nasunęły mi się po lekturze wybranych publikacji i ich opisu. Proszę doktoranta o ustosunkowanie się do nich.

W publikacji nr 1 „Accuracy of the Gamma Re-Theta Transition Model for Simulating the DU-91-W2-250 Airfoil at High Reynolds Numbers” (Energies) przeprowadzono gruntowną analizę porównawczą różnych modeli RANS. Między innymi porównywano wyniki symulacji stosując model Transition SST w wersji *unsteady* i *steady* (Fig. 2.2). W tego typu porównaniach globalny poziom zbieżności jak i ten w obrębie kroku czasowego powinny być identyczne. Zapewnia to, że przy $\Delta t \rightarrow \infty$ rozwiązanie po jednym kroku czasowym będzie identyczne jak to uzyskane w wersji rozwiązania *steady*. W przeprowadzonych symulacjach krok czasowy miał skończoną wartość i stosowano uśrednianie w czasie. Otrzymane wielkości średnie porównywano z tymi z wersji *steady*. Jeśli procedura uśredniania jest wystarczająco długa, co jest warunkiem koniecznym w tego typu testach, wyniki ‘steady’ i ‘unsteady’ powinny być takie same. Dlaczego więc one się różnią?

Jak należy rozumieć wyniki pokazane na Fig. 2.3? W podpisie napisano, że są to wyniki dla kąta natarcia 4 stopnie, a na rysunku 2.3a pokazano, wyniki w funkcji kąta natarcia. Podpis pod tym rysunkiem w publikacji jest taki sam.

Na Fig. 2.7a pokazano współczynnik siły nośnej (C_L) i skomentowano, że jego przebieg jest nieliniowy. Nie zgadzam się z tym twierdzeniem. W mojej ocenie przebieg C_L jest ewidentnie liniowy. W zakresie $\alpha = 0 - 6.47deg$ oraz $\alpha = 6.47 - 10deg$ różnice są wyłącznie w nachyleniu C_L . Proszę o komentarz.

związanych z metodami dyskretyzacji, poziomami błędów, metodą korekcji ciśnienia itp., informacji na temat czasochłonności obliczeń.

Praca jest napisana w sposób jasny i komunikatywny. Zauważyłem kilka błędów językowych, między innymi w użyciu „a”, „the”, ale praca jest zrozumiała i będzie czytelna zarówno dla „native speakerów” jak i dla pozostałych osób. W żaden sposób tego typu błędy, które niestety większość z nas popełnia, nie wpływają na moją merytoryczną ocenę pracy. Bez wątplenia wystawia ona pozytywne świadectwo wiedzy i umiejętnościom doktoranta i pozwala stwierdzić, że uzyskane przez niego wyniki stanowią wartościowy wkład w rozwój i stosowanie metod CFD w zagadnieniach aerodynamiki turbin wiatrowych.

3. Konkluzja

Reasumując, przedstawiona do recenzji rozprawa jest w mojej ocenie rozwiązaniem złożonego zadania naukowego. Doktorant z powodzeniem wykorzystał oprogramowanie ANSYS CFD do analizy skomplikowanych zagadnień przepływowych. Przygotowane przez niego przypadki testowe będą z pewnością mogły być wykorzystywane w przyszłości, a uzyskane wyniki mają dużą wartość poznawczą. Pozwala to stwierdzić, że zrealizowane zostały założone cele pracy. Przedstawiona rozprawa doktorska dowodzi wiedzy doktoranta w zakresie modelowania numerycznego przepływów i wykorzystania komercyjnych narzędzi obliczeniowych oraz stanowi potwierdzenie umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jana Michny spełnia wytyczne określone w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



