

Prof. dr hab. inż. Kazimierz LEJDA, dr h.c.
Katedra Pojazdów Samochodowych
i Inżynierii Transportu
E-mail: klejda@prz.edu.pl
TEL/FAX: (48-17) 854-31-12

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN I LOTNICTWA
Al. Powstańców Warszawy 8
35-959 RZESZÓW

Rzeszów, 2021-03-22

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Zdzisława Kamińskiego nt. „Analiza numeryczno-doświadczalna turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej”

Podstawa sporządzenia opinii: pismo Dr. hab. inż. Piotra Budzyńskiego, prof. PL z dnia 22 stycznia 2021 r. w sprawie sporządzenia recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Zdzisława Kamińskiego pod w/w tytułem.

1. CHARAKTERYSTYKA PROBLEMATYKI ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Poszukiwania alternatywnych źródeł energii w relacji do paliw kopalnych, w których energia jest pozyskiwana w wyniku procesów spalania, stanowi szczególnie w ostatnich latach intensywne źródło prac naukowców oraz praktyków branży przemysłowej dotyczących tej problematyki. Paliwa kopalne, będące dotychczas na przestrzeni wieków podstawą rozwoju społeczeństw na naszym globie, stały się istotną barierą postępu cywilizacyjnego ze względów ekologicznych.

Czynniki ekologiczne determinują środowisko danego obszaru naszej planety i w sposób zasadniczy oddziałują na występujące w tej przestrzeni organizmy, populacje i biocenozy. Wśród ekologicznych czynników wyróżniamy czynniki biotyczne (elementy przyrody żywej) oraz abiotyczne (elementy przyrody nieożywionej).

Istotą czynników biotycznych danego obszaru są organizmy żywe, jakie tutaj występują. Wynikają one z wzajemnych powiązań między tymi organizmami, w tym: z konkurencji, symbiozy, pasożytnictwa, kooperacji i in. Mamy zatem do czynienia nie tylko ze składem flory i fauny na określonym obszarze, ale również z współzależnościami między organizmami i wpływem tych organizmów na przyrodę nieożywioną.

W zakresie czynników abiotycznych mieszczą się głównie klimatyczne (temperatura, powietrze z występującą wilgotnością i ciśnieniem, wiatry, opady, nasłonecznienie) oraz edaficzne (związane głównie z właściwościami gleby, tj. jej wilgotność, struktura, zawartość soli mineralnych, kwasowość itp.). Tak

skonfigurowane czynniki ekologiczne stanowią podstawę wszelkich form życia na naszej planecie i naruszenie występującej koniecznej równowagi skutkuje poważnymi konsekwencjami dla istniejących ekosystemów.

Problematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej wpisuje się w aktualne problemy poszukiwania efektywnych źródeł energii będących alternatywą dla dotychczasowych paliw kopalnych. Dąży się do rozwiązań umożliwiających ekologiczne i ekonomiczne wykorzystywanie zasobów naturalnych, w tym energii wiatrowej. Przedmiotem rozważań i przeprowadzonych badań było określenie wpływu kąta rozwarcia łopat turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu na współczynnik szybkobieżności. Określenie wzajemnych uwarunkowań daje możliwość zidentyfikowania maksymalizacji współczynnika mocy poprzez precyzyjny dobór prędkości wału turbiny w korelacji do kąta rozwarcia łopat wirnika oraz prędkości wiatru. Tak określony cel pracy oparto o badania identyfikacyjne, obejmujące zarówno obliczenia symulacyjne oraz pomiary stanowiskowe.

Dla założonego celu pracy sformułowano tezę w formule następującej: **„kąt rozwarcia łopat turbiny o regulowanej powierzchni roboczej wpływa w istotny sposób na wartość optymalnego współczynnika szybkobieżności.”**

Symulacje numeryczne zrealizowano wykorzystując program FLUENT z grupy CFD, natomiast badania doświadczalne przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym w Katedrze Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych Politechniki Lubelskiej.

Podjęty do opracowania i analizy temat rozprawy doktorskiej należy uznać za interesujący i mający perspektywy aplikacyjne przy budowie nowych generacji turbin wiatrowych. W mojej ocenie, wybór tematu posiada aspekt prorozwojowy a poruszona problematyka charakteryzuje się wymiernymi wartościami poznawczymi.

2. CHARAKTERYSTYKA TREŚCI ROZPRAWY I OCENA STRONY METODYCZNEJ

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska zawiera w algorytmie spisu treści klasyczny podział na część studialną i badawczą. W części studialnej, opartej na analizie dostępnego materiału źródłowego, zasygnalizowano stan aktualnej wiedzy odnośnie turbin wiatrowych. Część badawcza obejmuje natomiast rozbudowaną treść dotyczącą zrealizowanych badań w zakresie odpowiadającym tytułowi rozprawy.

Całość opracowania liczy 94 strony tekstu skonfigurowanego obustronnie w formacie B5, łącznie ze spisem treści, streszczeniem w językach polskim i angielskim, wykazem ważniejszych oznaczeń oraz bibliografią wykorzystanych w pracy pozycji źródłowych. Rozprawa jest podzielona na 7 rozdziałów, z których

większość zawiera dodatkowo podrozdziały. W treści rozdziałów przytoczono bogaty materiał ilustracyjny stosownie do prezentowanych zagadnień.

Całość rozprawy doktorskiej otwierają spis treści, krótkie streszczenia jej zawartości w językach polskim i angielskim oraz wykaz oznaczeń. Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie do problematyki rozprawy z uwzględnieniem historycznego rozwoju turbin wiatrowych oraz podkreśleniem istotnych zalet ich konstrukcji o pionowej osi obrotu. Autor stwierdza, że proponowane w pracy rozwiązanie turbiny ma charakter innowacyjny i polega na podzieleniu łopat na łopaty górne i dolne, które względem wzajemnego położenia umożliwiają zmianę kąta, co pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie prędkości wiatru i zarazem uniknięcie przekroczenia dopuszczalnych naprężeń mechanicznych całej konstrukcji.

Rozdział 2 przedstawia w skrótovej wersji (15 stron) stan aktualnej wiedzy dotyczącej turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu oraz charakterystykę tzw. „wyróżnika szybkobieżności”, który pozwala na ocenę walorów eksploatacyjnych turbiny. Istotą treści tego rozdziału jest natomiast przedstawiona koncepcja nowego rozwiązania wirnika turbiny wiatrowej. Innowacyjność zaprezentowanej wersji polega na możliwości płynnej zmiany powierzchni roboczych łopat w warunkach zmiany prędkości wiatru, szczególnie w warunkach niekontrolowanych silnych podmuchów. Zmienna powierzchnia łopat zabezpiecza przed ewentualnym zniszczeniem konstrukcji turbiny w przypadku wystąpienia większych od dopuszczalnych prędkości wiatru.

Istotnym dla oceny merytorycznej rozprawy pozostaje rozdział 3, w którym określono cel, tezę i zakres pracy dotyczący całościowych badań obejmujących symulacje numeryczne i eksperymenty rzeczywiste. W pkt. 1 niniejszej recenzji, dotyczącym charakterystyki problematyki rozprawy doktorskiej, zostały podane zarówno cele oraz sformułowana teza pracy i jej ramowy zakres. W ujęciu szczegółowym dotyczącym zrealizowanych badań ich zakres był następujący:

- opracowanie modelu 3D turbiny wiatrowej,
- badania symulacyjne mechanizmu obrotu pojedynczej łopaty pionowej turbiny wiatrowej oraz mechanizmu sterującego turbiną,
- badania symulacyjne wytrzymałości, trwałości, dynamiki i oporów aerodynamicznych,
- opracowanie modyfikacji modelu 3D turbiny w oparciu o wyniki badań symulacyjnych,
- badania stanowiskowe aerodynamiczne modelu turbiny,
- badania stanowiskowe poszczególnych komponentów turbiny,
- analiza wyników badań stanowiskowych.

Przeprowadzone badania symulacyjne turbiny wiatrowej stanowią tematykę rozdziału 4. Przedstawiono tutaj w odpowiednich tematycznych podrozdziałach: model matematyczny turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej, model geometryczny wirnika turbiny, wyniki badań symulacyjnych, analizę i interpretację uzyskanych wyników oraz wynikające z wyników symulacji wnioski i sugestie konstrukcyjne.

Wyniki badań symulacyjnych stanowiły punkt odniesienia do przyjęcia odpowiedniej strategii badań doświadczalnych i związanego z tym faktem stanowiska badawczego. Rozdział 5 w pracy dotyczy właśnie opisu skonfigurowanego z odpowiednich przyrządów i zespołów stanowiska badawczego, którego podstawowym urządzeniem był tunel aerodynamiczny GUNT (model HM170). Oprzyrządowanie tunelu w dodatkowy układ generowania stabilnego przepływu strumienia powietrza oraz układ pomiarowy momentu obrotowego metodą tensometrii rezystancyjnej pozwoliło na minimalizację błędów pomiarowych wynikających z pulsacji ciśnienia i występujących oporów przepływu. Akwizycja sygnałów pomiarowych była realizowana przez odpowiednio zestawiony system komputerowego przetwarzania danych wykonanym w środowisku LabVIEW 8.1.

Z pewnością kluczowym rozdziałem rozprawy doktorskiej pozostaje rozdział 6 dotyczący zrealizowanych badań stanowiskowych. Przedmiotem badań był wirnik turbiny wiatrowej, natomiast program obejmował przeprowadzenie pomiarów dla różnych wariantów rozstawienia łopatek turbiny (30° , 60° , 90°) przy prędkości przepływającego powietrza $v=3,5+8,0$ m/s. Sumarycznie wykonano 870 pomiarów przy zachowaniu założonych parametrów. Wyniki zrealizowanych badań przedstawiono na wykresach umożliwiającym identyfikację mocy elektrycznej turbiny w funkcji prędkości obrotowej wirnika oraz kąta rozwarcia łopat. W rozdziale tym przeprowadzono również analizę porównawczą wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Otrzymane wyniki badań potwierdziły, że wirnik o regulowanym ustawieniu łopat umożliwia regulację mocy turbiny w szerokim zakresie prędkości obrotowej wału głównego turbiny. Wyniki badań w tunelu aerodynamicznym poddano analizie statystycznej celem wyznaczenia optymalnego wyróżnika szybkobieżności stosując test t-studenta.

Podsumowanie całości rozprawy i sformułowane wnioski stanowią treść rozdziału 7. Autor stwierdza, że cele naukowe i użyteczne według założeń przyjętych w dysertacji zostały osiągnięte a sformułowana teza jednoznacznie uzyskała potwierdzenie.

Całość opracowania zamyka wykaz cytowanego w rozprawie materiału źródłowego pochodzącego z pozycji opublikowanych, stron internetowych, informacji różnych stowarzyszeń, fundacji, towarzystw itp.

Biorąc pod uwagę całość rozprawy doktorskiej w aspekcie struktury podziału treści na poszczególne rozdziały i podrozdziały uważam, że strona merytoryczna jest poprawna odnośnie kolejności prezentowanych zagadnień i odpowiada wymogom prac doktorskich o profilu technicznym (analiza materiału źródłowego w zakresie tematu pracy, sformułowanie celu, zakresu i tezy rozprawy, badania symulacyjne i eksperymentalne oraz podsumowanie i wnioski). Mam jednak uwagę do niezwykle ważnego dla każdej rozprawy doktorskiej rozdziału, w którym Doktorant formułuje tezę zasadniczą oraz określa cel i zakres opracowania. W recenzowanej pracy jest to rozdział 3 obejmujący ok. 2/3 strony, w którym brak jest wymaganego szerszego komentarza do przyjętej tezy oraz uzasadnionego określonymi czynnikami celu pracy, zdefiniowanego konkretnymi uwarunkowaniami zewnętrznymi (przemysł, nauka itp.). Odnośnie strony redakcyjnej rozprawy należy podkreślić wyjątkową staranność i czytelność zawartego w pracy materiału ilustracyjnego (wykresy, tabele, zdjęcia), co pozwala na prawidłową interpretację wyników zrealizowanych badań oraz tendencji zmian analizowanych parametrów.

3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Problematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej dotyczy badań innowacyjnej turbiny wiatrowej małej mocy o pionowej osi obrotu, której podstawowym walorem jest odporność na silne podmuchy wiatru. Istotą rozwiązania jest podział łopat turbiny na łopaty górne i dolne, a następnie regulowanie kąta wzajemnego ich położenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu w sytuacji niebezpiecznie dużej prędkości wiatru, łopaty zbliżają się do siebie zmniejszając pole powierzchni czynnej. Powoduje to obniżenie wypadkowego momentu obrotowego i zabezpiecza przed przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń mechanicznych całej konstrukcji.

Aspektem naukowym pozostaje w dysertacji określenie charakterystyk mocy turbiny w funkcji wyróżnika szybkobieżności, prędkości wiatru oraz kąta rozchylenia łopat, co pozwoli na sterowanie turbiną celem uzyskania maksymalnej dostępnej sprawności przetwarzania energii wiatru. Biorąc pod uwagę wymieniony aspekt naukowy rozprawy i wynikający z tego faktu bezpośrednio walor praktyczny, wartość merytoryczną pracy doktorskiej oceniam wyjątkowo pozytywnie. Kontynuacja badań z tego zakresu może doprowadzić do ciekawych rozwiązań w zakresie wykorzystania energii wiatrowej jako alternatywnej w stosunku do paliw kopalnych.

Analizując wartość merytoryczną i aspekt naukowy recenzowanej pracy doktorskiej za istotne i ważne walory opracowania należy uznać:

- podjęcie tematu z zakresu energii alternatywnej, co jest niezwykle ważne w kontekście ochrony środowiska naturalnego,

- wykorzystanie do analizy dotyczącej problematyki pracy materiałów pochodzących z różnych źródeł (niekoniecznie z wydawnictw opublikowanych),
- opracowanie modelu matematycznego i geometrycznego turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej,
- przeprowadzenie badań symulacyjnych przepływu powietrza wokół powierzchni roboczych turbiny,
- opracowanie i kompletacja oprzyrządowania stanowiska badawczego z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego,
- zrealizowanie badań stanowiskowych turbiny wiatrowej,
- ocena istniejącej korelacji pomiędzy wynikami badań symulacyjnych i doświadczalnych.

Należy wspomnieć, że przedmiotem badań była turbina wiatrowa z zainstalowanym wirnikiem, który uzyskał patent nr (11)219985 (tytuł patentu: *Wirnik o regulowanym położeniu łopat roboczych, zwłaszcza dla turbiny wiatrowej*; Wendeker M., Kamiński Z., Czyż Z.).

Reasumując, ocena merytoryczna rozprawy w mojej opinii jest wysoce pozytywna. Wyniki badań symulacyjnych i stanowiskowych potwierdzają w dużym stopniu adekwatność opracowanego modelu matematycznego dla turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej. Charakter zmian wyróżnika szybkobieżności w obydwu przypadkach jest bardzo podobny jakościowo. Wyniki badań symulacyjnych, ze względu na swoją specyfikę powtarzalności obliczeń, muszą w sposób oczywisty różnić się wynikami od uzyskanych w warunkach rzeczywistych stanowiskowych. Stąd też wyniki badań stanowiskowych, wskutek pewnego ich rozrzutu, zostały poddane analizie statystycznej, która potwierdziła zadowalający poziom istotności charakteryzujący wiarygodność otrzymanych wyników.

W tekście opracowania występują sporadycznie błędy gramatyczne, stylistyczne i interpunkcyjne. Biorąc pod uwagę tematykę rozprawy, użycie specjalistycznej nomenklatury nazewnicznej dla tej problematyki, dużą ilość materiału ilustracyjnego prezentującego wyniki badań, nieliczne błędy z tego zakresu nie obniżają wartości dysertacji.

4. PODSUMOWANIE OCENY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ I KONKLUZJA

Autor rozprawy doktorskiej podjął się ważnego i trudnego tematu z zakresu szeroko pojętej problematyki związanej z aerodynamiką przepływów. Głównym celem pracy była bowiem identyfikacja charakterystyki wpływu kąta rozwarcia łopat turbiny na współczynnik szybkobieżności, przeprowadzona w oparciu o badania zjawisk przepływowych zachodzących przy opływie łopat wirnika turbiny wiatrowej o pionowej

osi obrotu. Odwzorowanie tej charakterystyki umożliwia bowiem maksymalizację współczynnika mocy, dzięki precyzyjnemu doborowi prędkości obrotowej wału turbiny w zależności od prędkości wiatru oraz kąta ustawienia łopaty wimika.

Badania identyfikacyjne zostały wykonane w oparciu o obliczenia symulacyjne według opracowanego programu numerycznego oraz pomiary stanowiskowe z wykorzystaniem tunelu aerodynamicznego. W badaniach zastosowano metodykę sprzężeń zwrotnych zachodzących pomiędzy tymi rodzajami badań, która polegała na wzajemnym uwzględnianiu wyników otrzymywanych w poszczególnych etapach realizacji prac. Taka metodyka pozwoliła na uzyskanie rozwiązania charakteryzującego się możliwie najlepszymi właściwościami aerodynamicznymi.

Badania symulacyjne pozwoliły na określenie zakresu modyfikacji geometrii łopat turbiny oraz wytypowanie programu badań stanowiskowych. Wykonano szereg symulacji dla kilku wartości kąta wzajemnego położenia łopat oraz kilku wartości prędkości wiatru. Dla każdej kombinacji kąta położenia łopat i prędkości wiatru zadawano kilkanaście wariantów obciążenia prądnicy turbiny powodując zmianę jej prędkości obrotowej. Sposób ten umożliwił ocenę wpływu zadanej prędkości obrotowej na moc wyjściową turbiny oraz wyznaczenie prędkości, przy której moc turbiny osiąga maksimum dla zadanej prędkości wiatru.

Zrealizowana rozprawa doktorska wpisuje się z pewnością w prorozwojowe tendencje turbin wiatrowych. Wyniki badań symulacyjnych i doświadczalnych potwierdziły w znacznym stopniu poprawność opracowanego modelu matematycznego turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej. Charakter zmian wyróżnika szybkobieżności w obydwu przypadkach jest podobny jakościowo. Przyczyną niewielkiej różnicy jest charakterystyka sprawności prądnicy, która się zwiększa ze zwiększaniem mocy elektrycznej oraz prędkości obrotowej. Czynnikiem ten powoduje, że moc elektryczna turbiny jest mniejsza od mocy mechanicznej uzyskanej z energii wiatru.

Reasumując, założone cele rozprawy zostały osiągnięte a sformułowana teza uzyskała swoje potwierdzenie wynikami badań.

KONKLUZJA

Podsumowując recenzję wyrażam opinię, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Zdzisława Kamińskiego nt. „Analiza numeryczno-doświadczalna turbiny wiatrowej o regulowanej powierzchni roboczej” spełnia warunki zapisane w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia

26 września 2016 r. odnośnie ubiegania się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie Budowa i eksploatacja maszyn.

Biorąc pod uwagę wyrażoną opinię, rekomenduję Radzie Dyscypliny Naukowej Inżynieria mechaniczna Politechniki Lubelskiej przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie Pana Zdzisława Kamińskiego do dalszego postępowania zgodnie z obowiązującą procedurą.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Z. Kamiński', is written over the text. The signature is stylized and cursive.