

Łódź, 21 lutego 2024 roku

**prof. dr hab. inż. Krzysztof Jóźwik**  
**Instytut Maszyn Przepływowych**  
**Wydział Mechaniczny**  
**Politechnika Łódzka**

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kacpra Pałkusa pt. *“Low Pressure Turbine Efficiency Increase by Developing New Concept of Outer Air Seal”*  
wykonanej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Piotra Strzelczyka, prof. PRz oraz opiekunów mgr Wojciecha Bara i Karla Engela, Ph.D.,

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej z dnia 22.11.2023 r. (pismo RM-530-27-01/2023)

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została oceniona według pięciu kryteriów:

1. Wybór tematu, cel i zakres rozprawy;
2. Teza naukowa i oryginalność rozprawy;
3. Metodyka badań;
4. Krytyczna analiza treści rozprawy;
5. Ocena formalnej strony rozprawy.

### Wybór tematu, cel i zakres rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Kacpra Pałkusa poświęcona jest badaniom możliwości wzrostu sprawności niskociśnieniowej turbiny poprzez modyfikacje geometrii zewnętrznego uszczelnienia. Współczesne konstrukcje turbin są na tyle udoskonalone, że nie ma prostych metod radykalnego wzrostu ich sprawności. Uzyskanie ułamkowych przyrostów sprawności traktowane jest jako sukces, szczególnie biorąc pod uwagę moce i czas pracy urządzeń. Uszczelnienia łopatek turbin na ich zewnętrznej średnicy są w dalszym ciągu istotnym źródłem strat, a powstające przepływy wtórne zakłócają przepływy głównych strumieni i wywołują dodatkowe starty wynikające z niedopasowania napływu czynnika na powierzchnię łopat wirnika i statora. Wprowadzanie zmian konstrukcyjnych w układach uszczelnień musi być realizowane z zachowaniem wielu ograniczeń wynikających z charakteru pracy turbiny. Stąd, zagadnienie to nie jest łatwe, a nowa geometria musi zostać poddana weryfikacji nie tylko ze względu na przepływy, ale także chociażby z uwagi na zjawiska cieplne. W przedstawionej do recenzji rozprawie podjęto się zdefiniowania możliwych zmian konstrukcyjnych w uszczelnieniach dla trzystopniowej turbiny niskiego ciśnienia w celu uzyskania wzrostu sprawności jej pracy. Analizę wpływu wprowadzenia wybranych na drodze analizy modyfikacji zrealizowano poprzez eksperyment numeryczny, przy czym zbudowany model

poddano walidacji wykorzystując wyniki badań eksperymentalnych przedmiotowej turbiny otrzymane z kilku ośrodków naukowych. Istotnym jest, że dla określenia wpływu modyfikacji konstrukcji uszczelnień zweryfikowano istotność oddziaływania ich na pracę turbiny w ujęciu multidyscyplinarnym.

Podjęta w rozprawie tematyka jest ważna z punktu widzenia efektywności i poprawności pracy turbiny niskiego ciśnienia, zmniejszenia oddziaływania na środowisko i oszczędności paliwa lub energii wytwarzającej strumień czynnika podlegającego rozprężaniu. Jest to więc zagadnienie aktualne i istotne ze względów poznawczych i aplikacyjnych, a jego poprawna realizacja umożliwi zrozumienie zjawisk i oddziaływania parametrów geometrycznych uszczelnienia zewnętrznego wirnika na jakość i efektywność pracy turbiny niskiego ciśnienia.

W podrozdziale 1.3 (strona 8) sformułowano cele pracy, które zawarto w trzech istotnych punktach, jakimi są rozwój nowego, ulepszono rozwiązania zewnętrznego uszczelnienia powietrznego, które spowoduje wzrost sprawności turbiny niskiego ciśnienia o co najmniej 0,1% przy uwzględnieniu istoty wielodyscyplinarnych uwarunkowań i ograniczeń, wyznaczenie podstawowych parametrów wrażliwych i kierunków optymalizacji nowej koncepcji ze względu na sprawność aerodynamiczną turbiny niskiego ciśnienia, rozwój wiedzy pozwalającej na zrozumienie działania uszczelnień zewnętrznych, w szczególności o efektach wywołanych opracowanymi rozwiązaniami. Dla tak określonego w trzech obszarach celu Autor podał zakres niezbędnych prac koniecznych do zrealizowania, który obejmował:

- analiza dostępnych rozwiązań i stanu wiedzy,
- określenie głównych czynników wpływających na aerodynamikę powietrznych uszczelnień zewnętrznych,
- analiza wymiarowa i parametryczna analiza numeryczna pozwalająca na określenie zależności pomiędzy wielkościami determinującymi pracę uszczelnień i możliwości poprawy ich konstrukcji,
- opracowanie modyfikacji konstrukcji uszczelnień,
- wstępna selekcja opracowanych modyfikacji z punktu widzenia aerodynamiki, integralności strukturalnej, technologii wykonania, możliwości materiałowych, oddziaływaniem na przepływy wtórne i kosztów,
- opracowanie modelu numerycznego turbiny i jego walidacja,
- badania numeryczne modelu turbiny z wariantowymi geometriami uszczelnień według nowych konstrukcji (przedni deflektor, otwory odpowietrzające łopatek),
- zastosowanie opracowanych konstrukcji uszczelnień do nowej trzystopniowej turbiny niskiego ciśnienia.

Podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza mieści się w aktualnym obszarze zainteresowania przemysłu, głównie lotniczego, i jest interesująca również pod względem poznawczym. Tym samym stwierdzam, że problematyka jest dysertabilna i można ją zakwalifikować do dyscypliny Inżynieria mechaniczna.

### **Teza naukowa i oryginalność rozprawy**

Autor nie sformułował formalnie tezy naukowej pracy, co nie jest błędem, ale wydaje się, że zdefiniowanie tezy ułatwiłoby organizację całego procesu, jak i redagowanie rozprawy.

Określając oryginalność pracy należy się odnieść do zdefiniowanych celów i zakresu pracy. Te wynikają bezpośrednio z przedstawionego stanu wiedzy, co omówione zostało zarówno we wstępnej części rozprawy, jak i w dalszych rozdziałach, odnosząc się bezpośrednio do zagadnień tam poruszanych. Drugi z rozdziałów pracy daje obraz stanu badań w obszarze konstrukcji uszczelnień zewnętrznych turbin niskiego ciśnienia, a także potencjalnych możliwości modyfikacji konstrukcji tych uszczelnień. Identyfikacja potencjalnych możliwości stanowi w rzeczywistości fundament dla sformułowania celów i zakresu dysertacji. Daje to także jasny obraz nowości realizowanych w ramach pracy, a efektem dodatkowym są zastrzeżenia patentowe chroniące powstałe rozwiązania.

Cele i zakres pracy budzą nadzieje, że poprawna realizacja badań i ich omówienie stanowić będzie oryginalny wkład zarówno w obszar aplikacyjny, jak i poznawczy dyscypliny Inżynieria mechaniczna.

### **Metodyka badań**

Doktorant w pracy przeprowadza serie badań numerycznych wykorzystując do tego model numeryczny geometrii stopnia lub stopnie turbiny osiowej niskiego ciśnienia. Symulacje numeryczne przepływu i analiza zjawisk zachodzących w trakcie pracy stopnia rozprężającego poprzedzona jest analizą wielkości fizycznych mających wpływ na przepływ lub, których wartości lub nawet zachowanie jest uzależnione od konstrukcji i geometrii uszczelnienia zewnętrznego. Dla realizacji zakresu badań numerycznych konieczna jest weryfikacja modelu turbiny i uszczelnienia, a także przyjętych warunków przeprowadzenia obliczeń przepływu.

Jednakże, aby zrealizować symulacje przepływu koniecznym było opracowanie zmian i modyfikacji konstrukcji uszczelnienia zewnętrznego wirnika turbiny. Zaproponowane rozwiązania zostały zanalizowane z punktu widzenia wymienionych w zakresie pracy obszarów warunkujących poprawność konstrukcji, jej realność zastosowania i wpływ pozytywny na sprawność. W tym miejscu należy zaznaczyć, że w rozprawie nie podano wszystkich branych pod uwagę rozwiązań, a dla obszaru analizy wskazano multidyscyplinarną grupę, która rozpatrywała poszczególne rozwiązania, ich zalety i wady. Nie można więc określić w jakiej części i ile rozwiązań powstało przy udziale Doktoranta.

W dalszej części dokonano opracowania modelu trzystopniowej turbiny niskiego ciśnienia wzorując się na turbinie będącej obiektem badań eksperymentalnych w Stuttgarcie (*Institute of Aircraft Propulsion Systems*). Z pracy nie wynika, czy do budowy siatek wykorzystano rzeczywistą geometrię turbiny, czy też zbudowano model i na jakiej bazie. W pracy podano także pewne parametry określające dobroć siatki, ale nie wskazano kto wygenerował siatkę. Jedyna informacja dotyczy jedynie faktu, że badania siatek nie były realizowane w pracy, a ich dobroć zbadał inny badacz. Podano także, że bezwymiarowa odległość  $y^+$  od ścianki dla pierwszego elementu siatki wynosi około 1. To dość nieprecyzyjne określenia dla tak istotnego parametru. Powstaje więc pytanie, czy była to wartość większa, czy też mniejsza niż 1?

W pracy podano, że siatka została podzielona na dwa obszary – głównego przepływu oraz obszaru wolnych objętości w okolicach wierzchołków łopatek i uszczelnień, a następnie siatki te połączone. To zagadnienie jest niezwykle ważne i w mojej opinii wymagałoby wyjaśnienia – jak dokonano procesu integracji oddzielnie wygenerowanych siatek w jedną przestrzeń obliczeniową i jak zapewniono przejście z części wirującej w część statyczną?

Na bazie wygenerowanego modelu dokonywano modyfikacji konstrukcji wprowadzając opracowane modyfikacje uszczelnień zewnętrznych, przy czym posiłkowano się dla wstępnych obliczeń modelem 1,5 stopnia badanej turbiny. Dla takiego modelu turbiny wykonywano modyfikacje siatek obliczeniowych, a nawet dla badań zachowania uszczelnienia z otworami odciażającymi dokonano porównania wyników w ujęciu względnym dla trzech typów. W dalszym ciągu nie ma informacji o badaniach dobroci siatek.

Wykorzystano siatki obliczeniowe do symulacji przepływów i porównania wyników z wynikami badań eksperymentalnych modelowej turbiny w układzie trzystopniowym, jak i także 1,5 stopnia (modelowa turbina wykorzystywana do badań eksperymentalnych w takiej konfiguracji znajduje się w Hanowerze – *Leibniz University of Hannover* – i wyniki tych badań użył Doktorant do weryfikacji poprawności obliczeń numerycznych w pracy). Dla tak zweryfikowanej metody Autor wykonał symulacje przepływu, analizę wyników dla wprowadzonych modyfikacji, kreślił najbardziej odpowiednie miejsca w konstrukcji turbiny dla wprowadzenia zaproponowanych usprawnień, a następnie wyznaczył całkowity zysk w efektywności działania uszczelnień i ich oddziaływanie na sprawność turbiny w przypadku zastosowania obydwu modyfikacji jednocześnie.

Podstawą realizacji pracy jest eksperyment numeryczny, a wyniki badań eksperymentalnych zrealizowanych w innych ośrodkach badawczych na stanowiskach badawczych użyte zostały do wykazania poprawności użytej metody numerycznej. Zakres zrealizowanych badań jest istotnie duży. Autor dokonał głębokiej analizy konstrukcji uszczelnień, wpływu na działanie turbiny i ograniczeń dla modyfikacji ich geometrii, a także konstrukcji wynikających z uwarunkowań w układzie wieloaspektowym.

Proponowana metodyka budzi zastrzeżenia wymienione powyżej i wymaga wyjaśnienia podczas dyskusji nad rozprawą.

### **Krytyczna analiza treści rozprawy**

W podanym w pracy spisie używanych symboli nie uwzględniono jednostek do wymienionych wielkości fizycznych. Wśród wymienionych symboli zawarto strumienie masy, które w języku pracy (angielskim) mają podaną niepełną nazwę (zamiast *mass flow rate* jest jedynie *mass flow*). Uwaga ta dotyczy całej pracy w miejscach, w których istnieje odniesienie do strumienia masy.

#### Rozdział 1

We wstępie (strona 5), mówiąc o emisji CO<sub>2</sub> użyto jednostki (*metric tones*), która nie należy do układu SI. Co ona oznacza?

Na stronie 6 użyto niefortunnego określenia, że linie lotnicze wybierają silnik, a to raczej producenci samolotów dobierają silniki, nawet w sytuacjach, gdy są możliwe do zastosowania produkty różnych producentów.

Na tej samej stronie mówiąc o spalaniu paliwa Autor wskazuje, że jednym z czynników pozwalających na zmniejszenie zużycia jest zmniejszenie ciężaru poprawnie byłoby użyć masy, jako wielkości fizycznej dającej taki efekt. Błąd ten powtórzono w dalszej części pracy.

Także na stronie 6 Doktorant wskazuje, że można uzyskać redukcję jednostkowego zużycia paliwa o 1% osiągając jednoprocentowy wzrost sprawności turbiny. Pytanie, czy Autor ma na myśli wzrost o 1% czy jednoprocentowy wzrost sprawności?

Na rysunku 1.1 (strona 7) użyto w dziwny sposób wielkości fizycznych dla osi rzędnych i odciętych, co jest powielane w dalszej części pracy. Badanie przebiegu funkcji wzdłuż wysokości (nawet względnej) kanału wskazuje, że jest to wielkość zmienna, dla której wyznacza się wartości funkcji, a więc powinna ona być przypisana do osi odciętych, a nie jak w pracy, do osi rzędnych.

## Rozdział 2

Na stronie 21 mówi się o stratach oraz transporcie ciepła i zależności zmian tych wielkości od zmian wartości m. in. liczby Reynoldsa. Jest jedna liczba Reynoldsa, która może przyjmować różne wartości, a nie jak w pracy – liczby Reynoldsa.

Autor opisuje uzyskanie dobrych wyników przy użyciu modelu turbulencji  $k - \omega$  – raczej  $k - \epsilon$  (strona 24).

Na stronie 30 podaje się odniesienie do rysunku poniżej – to bardzo niefortunne odniesienie. Należy wskazywać konkretny numer rysunku, a nie jego położenie względem tekstu.

Omawiając udziały strat powstających w różnych obszarach przepływu wskazuje się, że 20% i 15% straty są podobne co do udziału. To zdecydowanie różne udziały, które względem całkowitych strat różnią się o istotne 5%.

## Rozdział 3

Rozważając model czynnika założono, że jest to gaz idealny (strona 43). A do jakiego czynnika rzeczywistego ten model się odnosi?

Na stronie 46 porównuje się wyniki uzyskane dla różnych typów otworów odciążających i Autor użył stwierdzenia „*minor modelling error*”. Co to stwierdzenie oznacza?

Także niezrozumiałym jest fragment zdania ze strony 49: „*Dissipation of the viscous strain depends on the time mean flow, ...*” Proszę o wytłumaczenie jego znaczenia.

## Rozdział 4

Na stronie 51, co także występuje na stronie 54, Doktorant przedstawia uzyskane wyniki sprawności turbiny wskazując, że mieszczą się one w obszarze niepewności pomiarów (raczej niepewności wyników pomiarów). Czy niepewność ta została wyznaczona, w jaki sposób i jakie są jej wartości? W tekście pracy oraz na rysunkach przedstawiających wyniki nie ma wartości niepewności zaznaczonych.

Na rysunku 4.8 (strona 58) pokazano schemat stanowiska badawczego. Czy to jest stanowisko skonstruowane przez Doktoranta (do rysunku nie ma jakiegokolwiek referencji)?

## Rozdział 5

Na stronie 75 wskazuje się, że liczba Reynoldsa jest obrazem relacji pomiędzy siłami masowymi i lepkości. Bardziej precyzyjne byłoby wskazanie na relację pomiędzy siłami bezwładności i lepkości.

## Rozdział 6

W pierwszym akapicie rozdziału 6 (strona 81) rozważania dotyczą wieloaspektowego oddziaływani na konstrukcję elementów turbiny i kończą się stwierdzeniem, że spełnienie tych wymagań umożliwi ich zastosowanie w „środowisku silnika”. Proszę o wyjaśnienie pojęcia środowisko silnika.

W kilku miejscach pracy wymienia się wielodyscyplinowe kryteria wpływające na możliwe rozwiązania uszczelnień. Podrozdział 6.1 (strona 82) dotyczy kluczowych aspektów,

jednak nie zostały one wymienione, a jedynie powtórzono obszary, których dotyczą. Proszę o sformułowanie tych kryteriów, skoro były wzięte pod uwagę.

W ostatnim akapicie omawianej strony mówi się o ilości przecieku („*amount*”). Czy dotyczy to masy czy też objętości?

#### Rozdział 7

Na stronie 90 w drugim akapicie występuje stwierdzenie, że obydwa rozwiązania modyfikacji uszczelnień dadzą porównywalny efekt. Na podstawie jakich przesłanek, obliczeń wysunięto taki wniosek?

Na stronie 94 wnioskuje Autor, że długość płetwy jest zasadniczym czynnikiem dającym poprawę sprawności. W pracy analizowano jedynie dwie długości dla konkretnej konfiguracji turbiny i takie stwierdzenie, czy też uogólnienie jest chyba nieuprawnione dla globalnego rozwiązania.

W tabeli 7-3 (strona 98) podano kilkanaście wielkości i trzy jednostki, nie przypisując wielkości i odpowiadającej jej jednostki. Co więcej, widnieją tam m. in. ciśnienie, prędkość, a jednostek tych wielkości fizycznych nie ma wymienionych.

We wzorze 7.1 wskazano na wielkości wpływające na liczby podobieństwa, które należy użyć wyznaczając przepływ przez otwory odciążające w łopatkach. Przyjęto, że inne wielkości niewymienione we wzorze można zaniedbać. Co było podstawą takiego założenia?

Trend linii dla uzyskanych wyników pokazanej na rysunku 7.19 (strona 105) określono jako ponownie bardzo liniowy („*again very linear*”). Zależność może być liniowa lub nieliniowa, ale nie może być bardziej liniowa.

W tytule podrozdziału 7.2.4 (strona 106) użyto określenia optymalizacja. Czy to rzeczywiście ma być proces optymalizacji, jakie wtedy mają być kryteria? A w dalszej części (kolejny pogrubiony podtytuł – strona 107) mówi się „*flow amount*”. Co to ma oznaczać?

#### Rozdział 8

Główne wnioski (podrozdział 8.2 – strony 126 i 127) sformułowano w punktach. W punkcie 2 mówi się o właściwym projektowaniu wielodyscyplinowym. Co to ma oznaczać?

Bardzo szeroki wykonany zakres pracy dotyczył wybranej konstrukcji turbiny, a wnioski sformułowano jako uogólnione. Proszę o uzasadnienie tak przyjętej formuły.

### Ocena formalnej strony rozprawy

Licząca 145 stron w części oficjalnej praca składa się z 8 rozdziałów, załącznika, w którym przedstawiono potwierdzenia przyznanych patentów na rozwiązania badane w pracy będące współautorstwem Doktoranta, spisu literatury, spisu ilustracji, spisu tabel, a prace w części nienumerowanej poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim. W spisie literatury zwarto 110 pozycji cytowanych źródeł literaturowych (także otwartym dostępie) oraz stron internetowych (w znamienitej mniejszości), usystematyzowanych alfabetycznie. Nie odnalazłem w pracy odniesienia do 9 pozycji znajdujących się w spisie literatury i są to następujące pozycje: 11, 31, 59, 60, 67, 80, 82, 90, 108. Praca napisana jest w języku angielskim i to jest najpoważniejszym błędem Autora. W pracy jest wiele błędów językowych, struktury zdań i gramatycznych, nieodpowiednio do kontekstu użytych słów, w wielu miejscach utrudniających lekturę i zrozumienie zagadnień omawianych. Na kilku rysunkach znajdują się dodatkowe oznaczenia, które w żaden sposób nie są na tych rysunkach wyjaśnione.

Wyjaśnienia można znaleźć dopiero w tekście pracy. W podpisach do rysunków i opisach tabel użyto kropki na końcu podpisów – są to równoważniki zdań i kropka oznaczająca koniec zdania nie jest wymagana. W odnoszeniu się do rysunków i tabel użyto złego sformułowania w języku angielskim. Powinno być „in Figure” lub „in Fig.” i to jest jedynie poprawna forma. Dla odnoszenia się do tabel obowiązuje ta sama formuła. Zamieszczone rysunki w pracy powinny mieć swoje odniesienie w tekście. Część rysunków nie jest przywoływana, a więc można odnieść wrażenie, że są zbędne. Przyjmując podział na rozdziały należy być konsekwentnym. W pracy poszczególne części nazywa się rozdziałami lub sekcjami.

### Podsumowanie

Pomimo uchybień i nieścisłości, które zawarłem w recenzji, uznaję, że mgr inż. Kacper Pałkus w Swojej rozprawie doktorskiej zawarł istotne osiągnięcia wynikające ze zrealizowanych badań. Zaliczam do nich modyfikację konstrukcji uszczelnień turbiny osiowej niskiego ciśnienia, co przyniosło udokumentowany badaniami numerycznymi przyrost sprawności pracy turbiny, opis wielkości wpływających na przepływ i oddziaływujących na uszczelnienia zewnętrzne turbiny, analizę struktury przepływu wokół uszczelnień, szczególnie po wprowadzeniu modyfikacji. Niezwykle istotne jest także wykazanie przez Doktoranta, że modyfikacje przez Niego zaproponowane zastosowane razem przyniosą istotny wzrost sprawności turbiny w badanej konfiguracji, a konstrukcje te są możliwe do zastosowania także w przypadku innych turbin osiowych niskiego ciśnienia. Materiał i wyniki zgromadzone podczas badań pozwolą w przyszłości na ich dalsze wykorzystanie i podjęcie prób optymalizacji, szczególnie istotnej z punktu widzenia aplikacji i konstruktorów, aby można precyzyjnie określić możliwości i sposoby zastosowania najlepszych konstrukcji uszczelnień do konkretnego zastosowania.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska posiada istotny ładunek wiedzy praktycznej. Temat pracy odpowiada zawartej w niej treści. Na podstawie analizy treści pracy doktorskiej uważam, że cel naukowy został osiągnięty.

Biorąc pod uwagę całość pracy stwierdzam, że Autor rozwiązał problem naukowy związany z Inżynierią mechaniczną, choć swym zakresem stanowi podejście interdyscyplinarne. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Kacpra Pałkusa spełnia kryteria określone Ustawą<sup>1</sup> w sprawie trybu i warunków przeprowadzania przewodów doktorskich i może być dopuszczona do dalszych etapów procesu. Rozprawę oceniam pozytywnie.



prof. dr hab. inż. Krzysztof Józwik

---

<sup>1</sup> Ustawa „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz.U. nr 65 poz. 595 z dn. 14 kwietnia 2003 r. z późniejszymi zmianami)