

Dr hab. inż. Tadeusz Pająk, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska
E-mail: pajak@agh.edu.pl

Kraków, dnia 14.02.2025 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Kamila Szczerby

pt.: „Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego”

Promotor rozprawy doktorskiej:

dr hab. inż. Stanisław Antas, prof. PRz

Promotor pomocniczy:

Dr inż. Marek Szumski

1. Podstawa i aspekty formalne opracowania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Szczerby pt.: „*Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego*” opracowana została na podstawie Uchwały nr 10/11/2024/RDIMech Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 27 listopada 2024 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Szczerby w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, przekazana autorowi niniejszej recenzji pismem o symbolu RM-530-10-02/2024 z dnia 27 listopada 2024 r., sygnowanym przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza prof. dr hab. inż. Andrzeja Burghardta. Stosowna umowa o dzieło NN-530-92/2024 (3) powierzająca wykonanie recenzji przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawarta została w Rzeszowie w dniu 27 stycznia 2025 r.

Promotorem niniejszej rozprawy jest dr hab. inż. Stanisław Antas, prof. PRz, reprezentujący Politechnikę Rzeszowską im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, Wydział Maszyn i Lotnictwa, Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej. Promotorem pomocniczym jest dr inż. Marek Szumski o tej samej afiliacji jak promotor rozprawy doktorskiej.

Autor niniejszej recenzji, zgodnie z §2 umowy o dzieło NN-530-92/2024 (3) dotyczącej wykonania przedmiotowej recenzji oświadcza, że posiada odpowiednie kwalifikacje, wiedzę i doświadczenie do profesjonalnego wykonania recenzji, a w szczególności:

- wykonanie przedmiotu umowy leży w granicach jego możliwości i nie istnieją żadne przeszkody natury technicznej i prawnej uniemożliwiające w całości wykonanie przedmiotu umowy,
- nie jest współautorem prac naukowych Kandydata do stopnia doktora,
- nie uczestniczył, ani nie uczestniczył wspólnie z Kandydatem do stopnia doktora w zespołach badawczych, realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych,
- nie prowadził wspólnie z Kandydatem do stopnia doktora prac naukowych w instytucjach naukowych,
- nie sporządzał recenzji w innych postępowaniach o awans naukowy Kandydata do stopnia doktora oraz nie pełnił w nich funkcji promotora lub promotora pomocniczego,
- nie zachodzą inne okoliczności określone w art. 245 ustawy z dnia 14 czerwca 1960 r. Kodeks postępowania administracyjnego (Dz. U. z 2023 r. poz. 775 ze zm.), które skutkowałyby niemożnością wykonania przedmiotu umowy.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska mgr inż. Kamila Szczerby pt.: „*Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego*” została zredagowana na 145 stronach w 10 rozdziałach. Praca zawiera łącznie 12 tabel numerowanych w obrębie danego rozdziału oraz podobnie numerowane 132 rysunki. Ponadto w rozprawie zamieszczono wymagane streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i indeksów. Istotnym atutem pracy doktorskiej jest przywołanie 106 publikacji bezpośrednio związanych z tematyką oraz celem rozprawy. Całość jest poprawnie wydrukowana i oprawiona.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

W rozdziale 1 stanowiącym wprowadzenie Doktorant, w podrozdziale 1.1., w ogólny sposób formułuje zasadniczy problem badawczy swojej rozprawy doktorskiej związany z elementem turbinowego napędu samolotów, a konkretnie dyfuzorem stanowiącym układ wylotowy sprężarki promieniowej kierującej sprężone powietrze do komory spalania, podkreślając że od poprawnie zaprojektowanej jego konstrukcji zależy moc silnika, zużycie paliwa, sprawność oraz czystość spalin, co istotnie wpływa na ślad węglowy emitowany przez napędy lotnicze i co jest aktualnie przedmiotem licznych dyskusji i założeń, w tym na forum Parlamentu Europejskiego. Doktorant wskazuje również ograniczenia wynikające z zastosowania sprężarek promieniowych w napędach lotniczych sprowadzające się do ich zastosowania jedynie w silnikach lotniczych małej mocy, zamykając swoje wprowadzenie słusznym stwierdzeniem, że zminimalizowanie wymienionych ograniczeń, to istotny krok na drodze udoskonalenia i szerszego zastosowania stopnia promieniowego nie tylko w napędach

lotniczych, ale także w stacjonarnych turbinach gazowych czy nawet technologiach kosmicznych, których dynamiczny rozwój ma obecnie miejsce.

Podrozdziały 1.2., 1.3. a szczególnie 1.4., to wspierana przeglądem literatury charakterystyka roli dyfuzora w sprężarce promieniowej, syntetyczny opis układu wylotowego sprężarek promieniowych i osiowo-promieniowych ze szczególnym akcentem na cechy charakterystyczne dla danego typu dyfuzora, z bardziej szczegółowym opisem poświęconym tytułarnemu dla niniejszej rozprawy dyfuzorowi zakrzywionemu, dla którego Doktorant formułuje dalej jedną z zasadniczych tez swojej rozprawy, dotyczącą krytyki przepływowego charakteru kanału dyfuzora zakrzywionego, skutkującego wyraźnie niekorzystnym profilem prędkości na jego wylocie, co jest efektem aktualnej konstrukcji tego kanału chronionego patentem [43] i co potwierdza literatura [36] i [72]. Swój wyrażony pogląd Doktorant potwierdza wynikami obrazującymi pole prędkości w tego typu dyfuzorze – rys. 1.13. – otrzymanymi na podstawie wstępnej analizy numerycznej, co raz jeszcze utwierdza Doktoranta odnośnie słuszności sformułowania swojej wiodącej tezy rozprawy. Takie podejście potwierdza już na wstępie dużą dojrzałość naukową Doktoranta, jak także bardzo dobre zrozumienie, zarówno od strony przepływowej jak i cieplnej, zjawisk decydujących o optymalnej konstrukcji kanału dyfuzora, jako podzespołu silnika lotniczego, decydującego o sprawności i stabilnej pracy stopnia sprężającego, mając pełną świadomość faktu, że przedmiotowy dyfuzor, to jedynie element pomiędzy stopniem sprężającym a komorą spalania z wzajemnymi zachodzącymi oddziaływaniami.

W zakończeniu podrozdziału 1.4., a tym samym w zakończeniu wniosków wynikających z szerokiego przeglądu literatury, głównie angielskojęzycznej i relatywnie współczesnej, Doktorant stwierdza, że żadna z analizowanych pozycji literatury nie włąbiła się dotychczas w problem ukształtowania kanału dyfuzora zakrzywionego w aspekcie analizy i zniwelowania jego niekorzystnego profilu prędkości na wylocie, co jest ostatecznym uzasadnieniem postawienia i zdefiniowania tezy niniejszej rozprawy doktorskiej.

Z tym ostatnim stwierdzeniem Kandydata do stopnia doktora można polemizować biorąc pod uwagę cytowane w wykazie literatury liczne publikacje naukowe promotora tej rozprawy, Pana prof. PRz dr hab. inż. Stanisława Antasa. Można uznać, że Doktorant kontynuuje jedynie w tym słabo jak dotąd rozpoznanym obszarze, o istotnym jednak znaczeniu dla dalszego rozwoju geometrii kanału dyfuzora zakrzywionego, swojego rodzaju dobrze już utrwaloną „Szkołę” promotora w zakresie szeroko już rozpoznanych układów wylotowych różnego typu dyfuzorów, teorii maszyn przepływowych, lotniczych silników turbinowych i innych zagadnień z zakresu technologii lotniczych.

W rozdziale 2 Doktorant definiuje in extenso wyżej awizowaną tezę i cel rozprawy oraz metody i narzędzia badawcze.

Teza pracy brzmi:

Istnieje możliwość poprawy rozkładu prędkości w przekroju wylotowym dyfuzora zakrzywionego zaprojektowanego zgodnie z modelem jednowymiarowym poprzez modyfikacje

geometrii ścianek kanału przepływowego w oparciu o współczynniki czułości wyznaczone metodą operatora sprzężonego.

Współczynniki czułości jak i operator sprzężony nie zostały na tym etapie rozprawy zdefiniowane, choćby w sposób syntetyczny.

Cel rozprawy jest konkretny i wyraża go bezpośrednio temat rozprawy. Obie metody badawcze; eksperymentalna i numeryczna, wymienione w tytule rozprawy są ze sobą wzajemnie sensownie powiązane. Doktorant definiuje także cząstkowe cele badawcze, które de facto stanowią tytuły zasadniczych rozdziałów rozprawy.

Przedstawione w podrozdziale 2.2. metody i narzędzia badawcze są bardzo dobrze, adekwatnie dobrane do zdefiniowanego celu i przyjętej jednej tezy rozprawy, łącząc wyniki eksperymentu z nowoczesnymi numerycznymi narzędziami badawczymi. Istotną rolę odgrywa tutaj szeroko zaprogramowany eksperyment, od opracowania projektu geometrii dyfuzora poprzez projekt i wykonanie dedykowanego stanowiska badawczego, opracowanie dedykowanych sond pomiarowych czy zaprojektowanie modułowego systemu pomiarowego, nie mówiąc o wykonaniu serii badań rozkładów prędkości w przekrojach dyfuzora. Stwierdzić należy, że tak przyjęty przez Doktoranta plan badawczy jest wnikliwie przemyślany, kompletny i rokuje osiągnięcie celu rozprawy jak także potwierdzenia przyjętej tezy.

Wspomniane wcześniej liczne opracowania promotora rozprawy doktorskiej, szczególnie pozycja [53] autorstwa prof. S. Antasa, umożliwiła Doktorantowi w oparciu o obliczenia termogazodynamiczne, jednowymiarowe wyznaczenie geometrii kanału dyfuzora zakrzywionego, co bardzo skrupulatnie prezentuje rozdział 3 rozprawy.

W rozdziale 4 przedstawiono, zachowując odpowiednie kryteria podobieństwa, przeliczenie/przeskalowanie podstawowych parametrów wcześniej obliczonego dyfuzora, co wynikało z konieczności uzyskania odpowiednich parametrów geometrycznych i przepływowych w przekrojach dyfuzora umożliwiających dobór dedykowanych sond pomiarowych niezakłócających wyników pomiarów i zapewniających akceptowalną niepewność pomiarową.

Kluczowym dla recenzowanej rozprawy, a szczególnie jej części dotyczącej eksperymentu, jest rozdział 5 prezentujący szeroki cykl przedsięwzięć wykonanych przez Doktoranta związanych z budową stanowiska badawczego, doбором zespołu sprzężającego, wykonaniem modelu dyfuzora, wstępnym badaniem jakości pola prędkości, a następnie zasadniczymi badaniami pola prędkości oraz intensywności turbulencji na wlocie do i wylocie z dyfuzora, a przede wszystkim związanych z określeniem równań zbadanych profili prędkości, implementowanych następnie do analizy numerycznej kanału dyfuzora zakrzywionego. Warto wspomnieć także o wykorzystaniu opatentowanego w Katedrze Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej PRz 32-kanałowego, różnicowego skanera ciśnień. Został także zaprojektowany i wykonany niezbędny osprzęt pomiarowy, na przykład dedykowane

grzebieniowe, wielopunktowe mikro sondy pomiarowe i 5-cio punktowa mikro sonda kierunkowa.

W rozdziale 5 Doktorant precyzyjnie opisuje wszystkie niezbędne procedury zapewniające uzyskanie jak najwyższej dokładności obszernej bazy pomiarowej, w tym kalibrację skanera ciśnień, kalibrację skanera sondy kierunkowej, schematy oprogramowania z modułem akwizycji danych DasyLab do obsługi 8-punktowej sondy grzebieniowej, diagramu pomiarowego rozkładu ciśnienia, prędkości i turbulencji w poszczególnych przekrojach badanego dyfuzora, a także opis manipulatora kartezjańskiego zapewniającego zautomatyzowanie pomiarów i ich bardzo dokładną powtarzalność pozycyjną. Doktorant dowodzi tym samym bardzo dobrej znajomości i adaptacji współczesnych, zdigitalizowanych, online realizowanych technik pomiarowych w zakresie badań skomplikowanych zjawisk przepływowych zachodzących w elementach lotniczych silników turbinowych.

Za interesujące naukowo osiągnięcie Doktoranta prezentowane w rozdziale 5, należy uznać nie tylko wyznaczenie szeregu profilów prędkości, ale także eksperymentalne wyznaczenie wartości współczynnika strat przepływu i współczynnika wzrostu ciśnienia statycznego C_p w funkcji strumienia masy powietrza przepływającego w kanale badanego dyfuzora zakrzywionego, co dobrze uzupełnia niłą dostępność tego rodzaju zależności w literaturze przedmiotu.

Podsumowując ocenę merytorycznej zawartości rozdziału 5 należy stwierdzić, że potwierdza ona nie tylko bardzo dobrą znajomość Doktoranta z zakresu teorii przepływu przez dyfuzor zakrzywiony, ale także wagę znaczenia badań eksperymentalnych wobec zaplanowanych badań numerycznych, jakie osiągnięte zostały w oparciu o zaprojektowane stanowisko badawcze wykorzystujące zaawansowane, współczesne techniki pomiarowe pozwalające jeszcze bardziej precyzyjnie dokonać opisu i oceny zjawisk przepływowych zachodzących w różnych przekrojach kanału dyfuzora zakrzywionego. Ocenę tę uzupełnia użyteczna wartość zaprojektowanego i zbudowanego stanowiska badawczego, łatwego do adaptacji dla potrzeb eksperymentalnych badań innych modeli dyfuzorów czy z niewielką jego modyfikacją innych elementów turbinowych silników lotniczych.

Efekty przeprowadzonych badań eksperymentalnych prezentuje rozdział 6, głównie pod kątem analizy kształtu otrzymanych profili prędkości na wlocie do dyfuzora, ich zależności a raczej braku tej zależności od kąta położenia sondy pomiarowej w przedziale $0 \div 180$ stopni, łącznie z słusznie zaproponowaną procedurą ich aproksymacji – z trafną decyzją o podziale na 3 odcinki krzywej ilustrującej profil prędkości – zmierzającą do jak najdokładniejszego wyznaczenia równań opisujących profil prędkości, co było niezbędne dla przeprowadzenia modelowania numerycznego dyfuzora zakrzywionego i zdefiniowania warunków brzegowych dla wykorzystanego w tym celu nowoczesnego oprogramowania Ansys Fluent. Określono także profil intensywności turbulencji. Zaprezentowane w tym rozdziale podejście Doktoranta zmierzające do matematycznego opisu profilów prędkości i intensywności turbulencji pod

kątem implementacji równań je opisujących do środowiska Ansys Fluent podkreśla również i w tym aspekcie bardzo dobre przygotowanie Doktoranta.

W rozdziałach 7, 8 i 9 Doktorant prezentuje część rozprawy dotyczącą analizy numerycznej, opisując w rozdziale 7 podstawowe etapy modelowania przepływu przez dyfuzor zakrzywiony, nakreślając schemat struktury problemu, definiując ogólnikowo zestaw podstawowych równań, wskazując wybrany model turbulencji oraz opisując dyskretyzację geometrii dyfuzora przyjmując warunki brzegowe wyznaczone dla wlotu do dyfuzora wyznaczone w części eksperymentalnej analizy. Wybrany spośród grupy dostępnych modeli dwurównaniowy model turbulencji $k - \omega$ SST wydaje się być modelem najbardziej adekwatnym, szczególnie w aspekcie poprawnego zamodelowania przepływu w warstwie przyściennej w kanale dyfuzora. Domknięcie układu równań następuje poprzez klasyczne przyjęcie hipotezy Boussinesq'a. Efektem tak przeprowadzanej analizy numerycznej są bardzo interesujące i naukowo wartościowe wyniki rozkładu ciśnienia statycznego na ściankach kanału dyfuzora – z potwierdzeniem istotnych i oczekiwanych różnic na ścianie wewnętrznej i zewnętrznej, rozkładu prędkości średniej oraz prędkości wzdłuż linii środkowej kanału jak i rozkłady prędkości w badanych przekrojach wlotu oraz wylotu z kanału dyfuzora wraz z zobrazowaniem struktur wirowych w kanale dyfuzora. Otrzymane wyniki analizy numerycznej w rozpatrywanych przekrojach dyfuzora są odniesione do wybranych pozycji literatury, co bardzo dobrze uwiarygodnia wyciągnięte stąd przez Doktoranta wnioski. Analiza numeryczna prezentowana w rozdziale 7 potwierdza również i w tym obszarze badań bardzo dobre przygotowanie Doktoranta.

W rozdziale 8 Doktorant potwierdza otrzymane na drodze numerycznej profile prędkości na wylocie z dyfuzora w odniesieniu do otrzymanych analogicznych wyników pomiarów eksperymentalnych – rys. 8.6, otrzymując w zależności od danej linii pomiarowej wręcz niemal idealne odwzorowanie lub z niewielkimi odchyłkami, co sensownie i wiarygodnie wyjaśnia. Podobnie interesująco przedstawia się porównanie wizualizowanych rozkładów prędkości w przekroju wylotowym dyfuzora, na drodze wizualizacji eksperymentalnie otrzymanego i numerycznie wyznaczonego pola prędkości – rys. 8.8.

Walidacji poddano także wyniki rozkładu ciśnienia spiętrzenia na wylocie z dyfuzora, które pod względem jakościowym są bardzo zbliżone do podobnych wyników obrazujących rozkładu prędkości, co biorąc pod uwagę zależność pomiędzy ciśnieniem spiętrzenia a prędkością w danym punkcie nie powinno dziwić, ale co jednak dodatkowo potwierdza precyzyjność przeprowadzonej analizy numerycznej.

Kolejnym przykładem walidowanego pola prędkości i parametrów przepływu w dyfuzorze zakrzywionym jest walidacja składowych wektora prędkości, czyli składowej c_x – kierunek głównego przepływu – z efektem wysoce zbieżnego odwzorowania metodą numeryczną, składowej c_y – kierunek poprzeczny – jako pomijalnej dla wartości wektora wypadkowego oraz składowej prędkości c_z – wzdłuż szerokości kanału – również o istotnym znaczeniu dla wartości wypadkowej i bardzo dobrym odwzorowaniu. Podobnie wysoce zbieżne z wynikami

eksperymentu jest numeryczne odwzorowanie przebiegu ciśnienia na ściankach kanału dyfuzora, co zdaniem recenzenta jest zasadniczym mechanizmem nierównomierności w rozkładach prędkości, może zbyt słabo w rozprawie uwypuklonym i przedyskutowanym.

Powyższe komentarze dotyczące zawartości rozdziału 8 jednoznacznie potwierdzają, że otrzymane wyniki będące efektem analizy numerycznej przepływu przez dyfuzor zakrzywiony znajdują, zarówno jakościowo jak i ilościowo, wysoce adekwatne odwzorowanie w wynikach otrzymanych na drodze eksperymentu. A wynikająca stąd konkluzja raz jeszcze potwierdza udokumentowaną w ten sposób bardzo dobrą umiejętność Doktoranta w zakresie adaptacji i praktycznego wykorzystania numerycznej mechaniki płynów.

Rozdział 8 zamyka dyskusja niepewności badań eksperymentalnych. Dokonano analizy niepewności pomiarów zarówno dla przypadku typu A jak i B. Zestawienia tabelaryczne typowych parametrów niepewności pomiarowej skanerów ciśnień jak i dla różnego rodzaju użytych w eksperymencie sond grzebieniowych nie budzą dyskusji. Jednak szkoda, że Doktorant poprzestał tylko na tabelarycznym zestawieniu i nie przedstawił własnego komentarza podsumowującego przedstawioną wyłącznie tabelarycznie analizę niepewności badań eksperymentalnych.

Rozdział 9 rozprawy doktorskiej, dotyczący optymalizacji geometrii dyfuzora w dążności do uzyskania równomierności profilu prędkości w jego przekroju wylotowym, to nie tylko merytoryczne zamknięcie rozprawy, ale przed wszystkim ostateczne potwierdzenie słuszności postawionej przez Doktoranta tezy, do udowodnienia której zbliżał się systematycznie w kolejnych, wcześniejszych rozdziałach swojej rozprawy. Doktorant przeprowadził proces optymalizacji dyfuzora z wykorzystaniem modułu Adjoint Solver, jako specjalistycznego narzędzia Ansys Fluent rozszerzającego oprogramowanie z grupy CFD, sprzężonego z udziałem narzędzi matematycznych i prowadzącego w tym przypadku do modyfikacji geometrii przekroju kanału wylotowego dyfuzora. Argumentami zdefiniowanej przez Doktoranta funkcji celu są geometria i uzyskane dla tej geometrii rozwiązanie przepływowe. Prezentacje wyników optymalizacji geometrii kanału dyfuzora Doktorant słusznie ograniczył jedynie do tych tylko obszarów, dla których widoczne były najbardziej istotne zmiany przekroju o znaczącym oddziaływaniu na strukturę przepływu, pomijając te obszary, które ze względów konstrukcyjnych nie mogłyby zostać poddane modyfikacji (średnica wylotowa, i jej obwodowe otoczenie). Otrzymane wyniki optymalizacji geometrii kanału dyfuzora są czytelnie opisane i przekonująco uzasadnione w podrozdziale 9.1., a także w odniesieniu do wynikających stąd zmian prędkości na dołączonych rysunkach od 9.3. do 9.10., ze szczególnym uwzględnieniem rysunków od 9.11. do 9.16. obrazujących kontury istotnie wyrównanych profili prędkości na wylocie, najlepiej ilustrujących rezultaty przeprowadzonej optymalizacji kształtu kanału dyfuzora. Jednocześnie rys. 9.18. potwierdza, że nawet nieznaczące zmiany kształtu przekroju poprzecznego kanału dyfuzora, w zakresie $0,2 \div 12\%$,

dają w efekcie oczekiwane wyrównanie profilu prędkości w przekroju wylotowym, co w sumie z powyższym jest ostatecznym potwierdzeniem słuszności postawionej w rozdziale 2 zasadniczej tezy niniejszej rozprawy doktorskiej.

Opracowany rozdział 9, to kolejny dowód umiejętności Doktoranta, tym razem w zakresie praktycznego zastosowania metody operatora sprzężonego wykorzystującego ocenę gradientową wybranego parametru kryterialnego. A kolejne spostrzeżenie prowadzi do stwierdzenia, że jest to metoda szybsza i tańsza niż analiza eksperymentalna, podczas której zmiany geometrii, zaproponowane nawet z dużą intuicją, mogą być dokonywane wielokrotnie i wymagające stąd wielokrotnego powtarzania badań.

4. Uwagi krytyczne i pytania

Uważna lektura uwag i komentarzy przedstawionych w ramach przeglądu poszczególnych rozdziałów rozprawy doktorskiej przytoczonych odnośnie naukowego, badawczego oraz utylitarne go charakteru recenzowanej pracy wyraźnie wskazuje, że nie ma tam miejsca na istotne uwagi krytyczne, wobec szeregu pozytywnych spostrzeżeń i ocen odnotowanych w aspektach merytorycznych przez autora niniejszej recenzji.

W aspekcie pozamerytorycznym, a przede wszystkim edytorskim, trzeba jednak przedstawić kilka uwag krytycznych:

- niemal w całym zakresie tekstu rozprawy nie są stosowane podstawowe zasady interpunkcji, brak wymaganych przecinków jest wyraźnie widoczny,
- w wielu miejscach, szczególnie w pierwszych rozdziałach rozprawy bardzo często są niepoprawione, pozostawione tzw. literówki,
- szereg rysunków nie jest w tekście oznajmionych,
- w stylu pisania niektórych oznaczeń wielkości fizycznych czy w nazewnictwie cytowanych równań zauważalny jest brak stosowania powszechnie przyjętych nazw.

Wymienione niedbałości w obszarze tekstu rozprawy, nie dotyczące jednak bardzo dobrej jakości graficznych ilustracji, są pewnego rodzaju negatywnym zaskoczeniem dla recenzenta wobec poprawnej, wysoko ocenianej warstwy merytorycznej tej rozprawy.

W zakończeniu oceny rozprawy doktorskiej celowym wydaje się postawić kilka pytań skierowanych do Doktoranta, które nasuwają się po szczegółowej lekturze Jego rozprawy:

- Doktorant słusznie zauważa, że jednym z wyzwań prowadzących do szerszego zastosowania promieniowych stopni sprężających w napędach lotniczych jest ograniczenie występowania przedwczesnego oderwania strumienia w kanałach łopatkowych, co prowadzi do wiadomych skutków w zakresie obniżenia sprężu, mocy oraz drgań całego zespołu. Pytanie brzmi: czy tego rodzaju oderwania mogą być także powodowane wstecznym oddziaływaniem nierównomierności przepływu w dyfuzorze zakrzywionym? Po jakiej stronie łopatki, czy tylko po stronie tylnej i w jakim zakresie obwodu promieniowego koła wirnikowego mogą one potencjalnie występować? Czy

można je w sposób doświadczalny zbadać i opisać, a jeśli tak, to przy pomocy jakich metod pomiarowych?

- W części eksperymentalnej rozprawy wiodącą rolę w zakresie pomiarów prędkości odgrywają dedykowane, wielopunktowe, specjalnie zaprojektowane miniaturowe sondy grzebieniowe. Czy zdaniem Doktoranta istnieją jednakowo wiarygodne inne metody pomiarów prędkości w przekrojach takich, jak w przypadku badanego dyfuzora zakrzywionego? Czy mogłyby, to być: mikro czujniki termoanemometryczne, a może dopplerowska anemometria laserowa LDA, albo analiza pola prędkości z ewentualnym aczkolwiek ograniczonym wykorzystaniem metody PIV (Particle Image Velocimetry) czy może jeszcze inne metody pomiaru prędkości?
- Gdyby Doktorant musiał ograniczyć swoją rozprawę tylko do jednej spośród dwóch analizowanych w swojej rozprawie metod badawczych, zakładając że każda z nich może pozwolić z większą lub mniejszą efektywnością oraz przy takich lub podobnych założeniach osiągnąć zamierzony jak w niniejszej rozprawie cel, to jaka byłaby to metoda; eksperymentalna czy numeryczna i dlaczego?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest przykładem kompleksowej realizacji postawionego w jej tytule celu. Połączenie wzajemnie powiązanych dwóch metod badawczych; eksperymentalnej i numerycznej jest zdaniem recenzenta optymalnym podejściem do rozwiązania zdefiniowanego celu badawczego i udowodnienia postawionej tezy tej rozprawy. Zarówno osiągnięcie celu rozprawy doktorskiej jak i udowodnienie jej tezy zostało w ten sposób bardzo dobrze zrealizowane przez Doktoranta, z uzyskaniem wielu naukowo oryginalnych i użytkowo/wnośnościowo interesujących efektów. Obszerność części eksperymentalnej niniejszej rozprawy byłaby w wielu przypadkach wystarczającym merytorycznym wkładem spełniającym wymagania stawiane pracom doktorskim. Swojego rodzaju kropką nad „i” jest jej część związana z analizą numeryczną.

Nie ulega wątpliwości, że tematyka niniejszej rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w profil Wydziału i Katedry, jaki reprezentuje Doktorant, w znacznym stopniu poszerzając już bogaty dorobek w zakresie konstrukcji i optymalizacji turbinowych napędów lotniczych. Tym samym nie budzi żadnych wątpliwości bezpośrednie powiązanie niniejszej rozprawy z dyscypliną inżynieria mechaniczna.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty opracowanej recenzji przedmiotowej rozprawy doktorskiej i jej walory powyżej podsumowane należy sformułować najistotniejszy wniosek końcowy:

- stwierdzający, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Szczerby pt.: „*Analiza eksperymentalna i numeryczna dyfuzora zakrzywionego*” spełnia wszelkie wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym

i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571 z późn. zm.) i tym samym, jako recenzent tej rozprawy przedkładam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o jej przyjęcie i dopuszczenie mgr inż. Kamila Szczerby do dalszego procedowania o nadanie stopnia naukowego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: inżynieria mechaniczna.

Dr hab. inż. Tadeusz Pająk, prof. AGH

Kraków, dnia 14.02.2025