



prof. dr hab. inż. Dariusz Butrymowicz

Katedra Budowy Maszyn i Techniki Ciepłej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Białostocka  
ul. Wiejska 45C, 15-950 Białystok,  
tel. 571 443 089  
505 835 170  
e-mail: d.butrymowicz@pb.edu.pl

Białystok, 08.05.2019

## **Recenzja rozprawy doktorskiej** **mgr inż. Pawła Bargiela** *Modelowanie efektu Ranque'a-Hilscha* *podczas ekspansji gazu w rurze wirowej*

Opinia została opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, Pana Prof. dr hab. inż. Andrzeja Szłęka.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest Prof. dr hab. inż. Janusz Skorek, zaś promotorem pomocniczym jest Dr hab. inż. Wojciech Kostowski.

### **I. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 128 stron. Rozprawa składa się z następujących części: zestawienia oznaczeń, zestawienia źródeł dofinansowania pracy, wprowadzenia (rozdział 1), rozdziałów 2-4 prezentujących własny materiał badawczy, podsumowania oraz zestawienia bibliograficznego. Zawartość poszczególnych rozdziałów obejmuje:

1. **Wstęp**, w którym Autor dokonał przeglądu stanu wiedzy dotyczącej rur wirowych w zakresie zasady działania, podejmowanych prac badawczych, zastosowań, a także sformułował cel i zakres rozprawy.
2. **Badania eksperymentalne**. W rozdziale przedstawiono stanowisko badawcze, zastosowane techniki pomiarów, metodykę badawczą, analizę błędów oraz zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych.
3. **Analiza numeryczna**. W rozdziale tym Doktorant przedstawił model geometryczny rury wirowej, procedurę tworzenia siatki numerycznej, metodykę obliczeń oraz uzyskane rezultaty dla analizowanego przypadku.
4. **Model temperatur granicznych**. W rozdziale tym Doktorant zamieścił propozycję własnego modelu analitycznego pracy rury wirowej, dokonał jego weryfikacji i sformułował wnioski w odniesieniu do proponowanego modelu.
5. **Podsumowanie i wnioski**. W Rozdziale tym Doktorant dokonał syntetycznego podsumowania uzyskanych wyników i wskazał na zakres planowanej kontynuacji prac.
6. **Bibliografia** zawierająca wykaz 146 pozycji literatury, obejmująca głównie najnowsze publikacje z renomowanych czasopism międzynarodowych. W spisie literatury znalazło się 96 artykułów naukowych z renomowanych czasopism specjalistycznych z listy JCR oraz międzynarodowych czasopism specjalistycznych, 7 referatów z konferencji

międzynarodowych, 16 pozycji książkowych i monograficznych, 10 patentów, dalsze pozycje to publikacje w literaturze technicznej, dokumentacja techniczna oprogramowania oraz sprzętu. Autor cytuje dwie własne publikacje współautorskie: artykuł opublikowany w *Journal of Power Technologies* (czasopismo indeksowane w bazie JCR) oraz w *Wiadomościach Naftowych i Gazowniczych* (techniczne czasopismo branżowe).

## II. Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował zasadniczy cel rozprawy w Rozdziale 1.2 jako: „opracowanie modelu temperatur granicznych dla ekspansji gazu w rurze wirowej oraz związanego z procesem efektu Ranque’a-Hilscha”. Doktorant zamieścił także następujące cele szczegółowe:

- w części eksperymentalnej pracy - opracowanie danych pomiarowych związanych z procesem ekspansji powietrza w rurze wirowej;
- w części pracy poświęconej obliczeniom numerycznym – analizę struktury przepływu oraz identyfikację przepływu wtórnego;
- w części poświęconej modelowaniu analitycznemu – opracowanie własnego modelu temperatur granicznych.

Dla wskazanych części pracy Doktorant wskazał zakres podejmowanych prac.

Doktorant nie sformułował tezy w postaci jawnej. Za tezę można uznać jednakże ogólne wskazanie w Rozdziale 1.2, że model temperatur granicznych, którego sformułowanie jest zasadniczym celem pracy, „powinien cechować się podwyższoną dokładnością szacowanych temperatur granicznych względem obecnie dostępnych modeli”.

Cel, teza oraz zakres rozprawy zostały sformułowane na podstawie analizy dotychczasowego stanu wiedzy w zakresie zagadnień dotyczących rury wirowej. Niewątpliwie sformułowany cel oraz wskazany szczegółowy zakres rozprawy ze sobą w pełni korespondują. Cel rozprawy jest sformułowany w sposób jasny i precyzyjny, zaś program prac o charakterze analitycznym oraz eksperymentalnym zaproponowany przez Doktoranta ze sformułowanym celem zasadniczo koresponduje. Co więcej, w układzie pracy, przy tak postawionym celu oraz zakresie - znajdują się zarówno wątki o charakterze prac w zakresie zaawansowanego modelowania numerycznego, modelowania analitycznego oraz szerokiego zakresu badań eksperymentalnych. Należy wziąć pod uwagę, że rozprawa podejmuje zagadnienia rozważane w literaturze i dotyczy zagadnień o stosunkowo wysokim stopniu kontrowersji związanych z wyjaśnieniem efektu Ranque’a-Hilscha. W tym kontekście wskazany cel oraz zakres rozprawy uznaję za w pełni adekwatne. Wskazane cele szczegółowe oraz zakres rozprawy w pełni korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów pozwalających na jej udowodnienie.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań eksperymentalnych modelowej rury wirowej, uzyskane wyniki modelowania numerycznego oraz zaproponowany model analityczny – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi oraz zakresowi rozprawy.

## III. Treść rozprawy

Wstęp do rozprawy Doktorant rozpoczął przedstawiając w sposób ogólny budowę i zasadę działania rury wirowej. Ogólnie scharakteryzował dostępne publikacje dotyczące zagadnień związanych z rurami wirowymi, wskazując na wzrost zainteresowania badaczy tymi

urządzeniami. Zostały przedstawione następnie aplikacje rur wirowych w różnych gałęziach przemysłu oraz uwarunkowania aplikacyjne. W dalszej części rozdziału Doktorant charakteryzował zasadnicze wielkości opisujące pracę rury wirowej oraz zdefiniował chłodniczą efektywność energetyczną rury wirowej, a następnie - opierając się na wynikach prac badawczych - wskazał na parametry geometryczne mające istotny wpływ na działanie rury wirowej. W dalszej części rozdziału przedstawiono różne warianty konstrukcyjne rur wirowych wraz z ich krótką charakterystyką. Kluczowym fragmentem rozdziału jest krytyczny przegląd literatury w zakresie prac badawczych podejmowanych w zakresie badań eksperymentalnych i modelowania pracy rur wirowych. Wskazany został kluczowy problem w tej dziedzinie, a mianowicie zagadnienie mechanizmu efektu Ranque'a-Hilscha, czyli zjawisko powstawania termicznego rozdziału strugi wirowej - ma wciąż otwarty charakter, co stało się inspiracją do podjęcia własnych badań przez Doktoranta. Zostały zwięźle scharakteryzowane cztery mechanizmy dyskutowane w literaturze naukowej odnośnie wyjaśnienia tego mechanizmu:

- zmiany temperatury w wyniku procesów lokalnej kompresji i ekspansji gazu wywołanego przepływem wtórnym, związanym z generacją wirów Görtlera - powstających w przepływie w pobliżu ściany wklęsłej;
- tarcie płynu, a w zasadzie mechanizm przekształcania się wiru swobodnego w wir jednorodny, co wymusza promieniowy transport energii;
- generowanie promieniowego gradientu temperatury wskutek promieniowego gradientu prędkości przepływu gazu;
- generowanie efektów ciśnienia akustycznego powodujących transport ciepła.

Następnie Doktorant dokonał przeglądu literatury w zakresie podejmowanych prac odnośnie modelowania analitycznego pracy rury wirowej, w tym zwłaszcza modeli temperatur granicznych. Szczególną uwagę Doktorant skupił na modelu zaproponowanym przez Simõesa-Moreirę (2010). Jest to stosunkowo prosty model oparty na analizie zmian entropii z uwzględnieniem modelu gazu doskonałego dla obydwu strumieni gazu. Jest to zatem model oparty na II Zasadzie Termodynamiki, który pozwala na ocenę dostępnego zakresu temperatury w króćcu zimnym w zależności od zadanej wartości udziału strumienia zimnego (jest to wielkość regulowana odpowiednim zaworem umieszczanym w króćcu gorącym). Doktorant krytycznie ocenił rezultat uzyskany w zakresie dolnej granicy temperatury odpowiadającej pracy izentropowej. Wskazał tym samym na potrzebę opracowania udoskonalonego podejścia do modelowania temperatur granicznych. W końcowej części rozdziału został sformułowany cel i zakres rozprawy, do czego odniosłem się w sekcji II niniejszej recenzji.

W Rozdziale 2 Doktorant przedstawił w sposób szczegółowy stanowisko badawcze oraz jego wyposażenie pomiarowe – dedykowane do badań testowanej rury wirowej o klasycznej konfiguracji dla powietrza. Przedstawiono układ wytwarzania sprężonego odolejonego i osuszonego powietrza o ciśnieniu zredukowanym do wymagań eksperymentu. Przedstawiono konstrukcję rury wirowej zaprojektowanej i zbudowanej do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Zastosowano komorę wirową z dwiema dyszami poddźwiękowymi. Wykonano zawór regulacyjny według własnego projektu – umożliwiający odpowiednią regulację podziału strumienia gorącego i zimnego. Dobrano zwężkę dla przepływu strumienia zimnego o stosunku pola otworu do pola przekroju poprzecznego komory rury wynoszącego około 1/16. Oceniono wymaganą grubość ścianki komory rury wirowej biorąc pod uwagę planowane do zastosowania ciśnienie robocze. Dobrano aparaturę pomiarową analizując możliwe do wystąpienia zakresy strumienia masy powietrza, ciśnień oraz temperatur. Przedstawiono informacje dotyczące błędów pomiarowych dla zastosowanego wyposażenia

pomiarowego. Przedstawiono procedurę pomiarową, uwzględniając efekty związane z wahaniami ciśnienia sprężonego powietrza wynikającymi z pracy sprężarki. Badania eksperymentalne zrealizowano dla pięciu geometrii rur wirowych, tj. dla stosunku długości rury wirowej do jej średnicy wynoszącego 45.58, 38.08, 32.64, 20.56 oraz 15.03, pozostałe cechy geometryczne rury (komora wirowa, przesłona, zawór regulacyjny) nie ulegały zmianie. Badania zrealizowano dla jednej wartości absolutnego ciśnienia wlotowego wynoszącej 300 kPa, zaś powietrze z obydwu stron wylatywało do otoczenia o ciśnieniu atmosferycznym. Temperatura powietrza wlotowego wahała się od 18.6 do 26.6 °C. Podstawowym parametrem regulowanym w trakcie wykonywania pięciu serii pomiarowych dla zadanych geometrii rury wirowej był stosunek rozdziału regulowany z zastosowaniem zaworu na króćcu gorącym: największy zakres tego parametru uzyskano dla rury o największej wartości stosunku długości do średnicy 45.58, tj.: od 0.217 do 0.879, natomiast dla stosunku długości do średnicy 15.03 uzyskano zakres zmienności rozdziału od 0.138 do 0.664. Uzyskane dane eksperymentalne zamieszczono w tabelach, natomiast bliższej analizie poddano rezultaty uzyskane dla największej wartości stosunku długości do średnicy, tj. 45.58. Dla tego przypadku wskazano na występowanie maksimum zmian temperatury po stronie gorącej i zimnej. Wskazano na to, że przepustowość rury wirowej zależy od długości rury wirowej. Dla trzech analizowanych stosunków długości do średnicy przeanalizowano uzyskiwane nadciśnienia w wylotowej części strony gorącej (mierzone na wierzchołku zaworu regulacyjnego) – wskazano, że nadciśnienie powstaje przy wartościach stopnia rozdziału powyżej około 0.5, przy czym wskazano na występowanie znacznych fluktuacji zakłócających ten pomiar. Dokonano oceny niepewności pomiarowej stopnia rozdziału powietrza, a także przeanalizowano niezbilansowanie się rury dla jednego przypadku geometrycznego. Oceniono efektywność energetyczną chłodniczą oraz grzewczą badanej rury również dla wybranego przypadku geometrycznego dla wartości stosunku długości do średnicy wynoszącego 45.58. Dokonano szacunkowej oceny liczby wirowej dla komory wirowej badanej rury, uzyskując oszacowanie na poziomie od 1.23 do 2.90.

W Rozdziale 3 przedstawiono budowę modelu numerycznego analizowanej rury wirowej oraz uzyskane rezultaty. Modelowanie zostało przeprowadzone dla wybranego punktu pracy dla rury wirowej o wartości stosunku długości do średnicy wynoszącego 15.03. Przedstawiono budowę geometrii rury wirowej dla analizowanego przypadku. W sposób bardzo szczegółowy podjęto zagadnienia budowy oraz oceny siatki numerycznej. Pod uwagę wzięto jeden z zasadniczych parametrów oceny jakości siatki, jakim jest parametr  $y^+$ , czyli bezwymiarową odległość pierwszego węzła siatki od powierzchni ściany kanału. Zastosowano siatkę numeryczną typu *high-Re*. Pomimo podejmowanych zabiegów - uzyskano stosunkowo wysokie wartości tego parametru wynoszące od 20 do 66. Dokonano szczegółowej oceny jakości siatki biorąc pod uwagę standardowe parametry: skośność elementów siatki, jakość ortogonalną oraz współczynnik proporcji. Dokonano szczegółowej analizy w zakresie doboru modelu turbulencji – bazując na analizie własności tychże modeli oraz stosowanych modelach przez innych badaczy. Wybrany został do zastosowania model *RSM  $\omega$ -based*. Szczegółowo przedstawiono formułowane warunki brzegowe, procedurę obliczeniową oraz ocenę stabilizacji rozwiązania. Dokonano oceny wrażliwości zagęszczenia siatki numerycznej na uzyskane niezgodności bilansu masy i energii. Przedstawiono własne podejście metodyczne do oceny stopnia recyrkulacji strumienia w komorze wirowej, bazującego na założeniu, że transport płynu w kierunku zimnym bądź gorącym odbywa się wyłącznie poprzez składowe osiowe wektora prędkości. Dla analizowanego przypadku uzyskano bardzo dużą zgodność pomiędzy zmierzonymi oraz obliczonymi średnimi wartościami temperatur statycznych na zimnym oraz gorącym końcu (strumienie mas zostały w obliczeniach założone jako warunki

brzegowe). Przeanalizowano uzyskane wyniki obliczeń numerycznych w zakresie rozkładów temperatury statycznej, liczby Macha, prędkości w kierunku stycznym oraz osiowym, gęstości. Uzyskano potwierdzenie wystąpienia wirów Görtlera. Uzyskane wyniki Doktorant wykorzystał do postawienia hipotezy o potwierdzeniu mechanizmu lokalnej kompresji i ekspansji, który jest odpowiedzialny za wywołanie efektu termicznego rozdziału w rurze wirowej. Zademonstrowano także, że uzyskane wyniki wskazują na wystąpienie znacznego udziału powietrza recyrkulującego we wnętrzu komory rury wirowej: w środkowej części komory ponad 40% powietrza uczestniczyło w recyrkulacji. Uzyskane wyniki zostały zwięźle podsumowane.

W Rozdziale 4 Doktorant podjął się sformułowania modelu analitycznego pracy rury wirowej w aspekcie oceny temperatur granicznych dla strony zimnej oraz gorącej. Zastosował w tym celu podejście formalne stosowane w literaturze – polegające na zbudowaniu zastępczego hipotetycznego obiegu z zastosowaniem procesów izentropowego sprężania, izentropowej ekspansji, podgrzewania izobarycznego, dławienia izentalpowego o takiej strukturze, aby jak najpełniej imitować zjawiska transportu masy i energii w rurze wirowej. Zakłada się uwzględnienie efektu recyrkulacji części czynnika roboczego. W modelu bazuje się na równaniach zachowania masy oraz energii, przy czym w bilansach energii nie bierze się pod uwagę energii kinetycznych, lecz jedynie entalpie statyczne. W efekcie Doktorant uzyskał układ dwóch niezależnych równań, w których dla zadanego stopnia rozdziału można, przy założonych parametrach wlotowych, obliczyć entalpie właściwe czynnika po stronie zimnej oraz gorącej, a na tej podstawie – temperatury na obydwu stronach. Z racji założonych izentropowych przemian sprężania oraz ekspansji postuluje się, że rzeczywiste temperatury końca zimnego powinny być wyższe, zaś końca gorącego – niższe od wyznaczonych bilansowo temperatur granicznych. Zademonstrowano spełnienie tego warunku dla własnych badań eksperymentalnych uzyskanych dla geometrii rury wirowej odpowiadającej stosunkowi długości do średnicy wynoszącemu 45,58, a także z danymi eksperymentalnymi Eiamsa i in. (2010) oraz danymi komercyjnie dostępnej rury wirowej firmy Vortec. W ostatnim przypadku uzyskano w niektórych danych niezgodność z proponowanym kryterium: temperatura na gorącym końcu zmierzona była wyższa od granicznej, co tłumaczy się efektem pomiaru temperatury dynamicznej zamiast statycznej w analizowanych danych.

Rozdział 5 obejmuje dwie części: pierwszą stanowi syntetyczne podsumowanie uzyskanych rezultatów w zakresie sformułowanego modelu analitycznego temperatur granicznych, przyjętej metody modelowania numerycznego rury wirowej, zwłaszcza w celu predykcji rozdziału termicznego. W drugiej części Doktorant sformułował program badawczy dotyczący kontynuacji badań podejmowanych w ramach rozprawy doktorskiej, a w tym: dotyczącej poprawy predykcji poprzez zastosowanie siatki typu *low-Re*; poprawy rozwiązania konstrukcyjnego testowej rury wirowej; zastosowania odmiennego typu geometrii, która potencjalnie mogłaby podwyższyć efektywność pracy rury wirowej; analizy możliwości aplikacyjnych rur wirowych, które dotąd podejmowane były w ograniczonym zakresie.

#### **IV. Oryginalność i wartości poznawcze rozprawy**

Recenzowana rozprawa dotyczy rozpoznania bardzo złożonych zjawisk występujących w rurze wirowej, zaś głównie – rozpoznania efektu Ranque’a-Hilscha dotyczącego rozdziału termicznego. Samo zagadnienie rozdziału termicznego należy do problemów o wciąż otwartym charakterze, zaś wyjaśnienie mechanizmu powstawania tego efektu należy do najbardziej intrygujących zagadnień naukowych w obszarze mechaniki płynów oraz

termodynamiki. Należy podkreślić, że od pojawienia się publikacji Ranque'a (1933) oraz Hilscha (1947) zagadnienie opisu pracy rury wirowej oraz wyjaśnienie fizycznych podstaw wystąpienia efektu rozdziału termicznego podejmowane jest w literaturze z zastosowaniem wielu różnych podejść, prowadzone są liczne badania eksperymentalne, realizowanych jest wiele podejść dotyczących modelowania tego efektu. W tym kontekście podjęcie tej tematyki w ramach rozprawy doktorskiej należy uznać za zadanie o bardzo ambitnym charakterze, wymagające ze wskazanej racji zaproponowania oryginalnego pomysłu, a nadto z racji bardzo złożonego przepływu – zastosowania zaawansowanego warsztatu w zakresie modelowania numerycznego. Niewątpliwie cennym elementem recenzowanej rozprawy jest krytyczne spojrzenie nie tylko na rezultaty prac opublikowanych w literaturze, lecz także krytyczna analiza własnych rezultatów i poszukiwanie dalszych możliwości rozwojowych. Doktorant wykazał się kreatywnym, oryginalnym podejściem w wielu elementach ocenianej rozprawy, np. przy ocenie szacunkowej wartości liczby wirowej na podstawie uwidocznionych osadów na powierzchni rury. W pracy bardzo rzetelnie opracowano model numeryczny, analizując dogłębnie zagadnienia dotyczące budowy siatki numerycznej, czy też doboru modelu turbulencji. Istotnym elementem jest krytyczna analiza własnych rezultatów. Zaproponowano własny model analityczny granicznych temperatur zimnego oraz gorącego końca rury wirowej, oparty na postulatcie dotyczącym mechanizmu powstawania efektu rozdziału termicznego poprzez recyrkulację części płynu w warunkach lokalnego procesu sprężania oraz ekspansji. Jakkolwiek recenzowana praca nie wnosi ostatecznego rozstrzygnięcia co do mechanizmu rozdziału termicznego zachodzącego w rurze wirowej, czego również nie osiągnięto w literaturze naukowej w ciągu kilkudziesięciu lat prowadzonych badań – wnosi jednak ważny wkład do głębszego rozumienia zjawisk ważnych z punktu widzenia pracy rury wirowej, zaś zaproponowany model może służyć jako racjonalne narzędzie do dalszych analiz pracy rur wirowych.

W ramach rozprawy doktorskiej zostały podjęte prace o charakterze kompleksowym, wnoszące znaczący wkład w rozwój podejmowanego zagadnienia zarówno w aspekcie rzeczowym, jak i metodycznym. W ramach pracy doktorskiej podjęto zagadnienia w zakresie modelowania analitycznego, modelowania numerycznego a także badań eksperymentalnych. Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzam, że w recenzowanej rozprawie doktorskiej zaprezentowano bardzo dojrzały warsztat pracy naukowej.

Za szczególne osiągnięcia Doktoranta uważam:

- zaproponowanie własnego modelu analitycznego granicznych temperatur końca zimnego i gorącego rury wirowej;
- przeprowadzenie kompleksowych badań eksperymentalnych identyfikujących pracę rur wirowych o różnych cechach geometrycznych;
- wykonanie obliczeń numerycznych bardzo złożonego przepływu w rurze wirowej wraz z jakościową analizą hipotezy dotyczącej mechanizmu termicznego rozdziału gazu.

Prezentowane w rozprawie rezultaty prac mają niewątpliwie w pełni oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy w pełni pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane.

Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą istotny wkład poznawczy w dziedzinie techniki cieplnej – zwłaszcza w zakresie zagadnień chłodnictwa – mieszczących się w obszarze dotyczącym dyscypliny: Energetyka.

## V. Wartości użytkowe rozprawy

Recenzowana rozprawa ma niewątpliwie walor aplikacyjny, wynikający wprost z jej tematyki oraz charakteru. W rozprawie doktorskiej podjęto zagadnienia predykcji pracy rury wirowej, przy czym z racji rozlicznych zalet tego urządzenia – znajduje ono coraz więcej praktycznych zastosowań w różnych dziedzinach techniki, a w tym w różnych obszarach techniki cieplnej. Niewątpliwie przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej prace badawcze przyczyniają się do rozwoju zastosowań rur wirowych, w tym zwłaszcza w obszarze związanym z technologiami chłodniczymi.

## VI. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

### VI.1. Uwagi o charakterze merytorycznym

W rozprawie zaprezentowano oryginalne oraz kompleksowe ujęcie podejmowanego zagadnienia. Zaprezentowany w rozprawie materiał analityczny oraz eksperymentalny wymagał znacznego nakładu pracy oraz inwencji i stanowi niewątpliwie oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe Doktoranta. Poniższe uwagi, mające w dużej mierze charakter komentarzy bądź sugestii - nie umniejszają mojej jednoznacznie pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej i w znacznej mierze mają raczej charakter porządkowy, formalny bądź dyskusyjny.

1. W rozprawie warto byłoby podjąć istotny wątek, jakim jest kwestia pracy dysz zasilających komorę wirową w zakresie poddźwiękowym bądź naddźwiękowym. Dla rozważanej w rozprawie rury wirowej z powietrzem jako czynnikiem roboczym, przy ciśnieniu odpowiadającym stosunkowi ciśnienia wlotowego do ciśnienia zasilania niższemu od stosunku krytycznego – wystąpi przepływ naddźwiękowy, zaś wydatek dyszy nie będzie zależał od wahań ciśnienia wewnątrz rury wirowej, dysza pracuje w warunkach naddźwiękowych. Takie warunki pracy są nawet rozważane w Tabeli 4.3 oraz Tabeli 4.4 na podstawie danych literaturowych. Z kolei we własnych badaniach Autor stosuje warunki poddźwiękowe zasilania komory wirowej. Zagadnienie to nie jest bliżej dyskutowane w rozprawie, ma ono natomiast istotne znaczenie z punktu widzenia kształtowania dysz napędowych znajdujących się w komorze wirowej (naddźwiękowe czy poddźwiękowe, w tym ostatnim przypadku dochodzi kwestia ustalenia parametrów pracy nominalnej). Zagadnienie to ma w konsekwencji wpływ na pracę rury wirowej, a być może nawet pośrednio na mechanizm tworzenia się efektu rozdziału termicznego.
2. Komentarza wymagałoby zagadnienie dotyczące kształtowania dysz napędowych testowanej rury wirowej. Przyjęto arbitralnie, że dysza ma być poddźwiękowa. Biorąc pod uwagę krytyczny stosunek ciśnień wynikający z relacji gazodynamicznych:

$$\beta = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}},$$

uzyskuje się dla powietrza ( $\kappa = 1.40$ ) wartość tego stosunku  $\beta = 0.528$ . Gdyby zatem wewnątrz komory wirowej panowało ciśnienie atmosferyczne (1.00 bar), wówczas powyżej ciśnienia wlotowego wynoszącego 1.89 bar uzyskuje się warunki przepływu krytycznego. W prowadzonych badaniach zasilano rurę wirową powietrzem o ciśnieniu absolutnym 3.00 bar, co wskazywałoby na konieczność zastosowania dysz naddźwiękowych. Jednakże wewnątrz komory wirowej najprawdopodobniej panuje ciśnienie istotnie wyższe od ciśnienia atmosferycznego, w związku z czym ocena

- precyzyjnych warunków wystąpienia przepływu krytycznego nie jest bezpośrednio możliwa. Można przypuszczać, że w badaniach Kurosaki (1982), których wyniki zamieszczono na Rys. 1.9, graniczną wartością ciśnienia powyżej której wystąpił przepływ krytyczny - jest ciśnienie około 2.4 bar (dla zastosowanej w tamtych badaniach geometrii rury wirowej). Zagadnieniu temu nie poświęcono jednakże w niniejszej rozprawie uwagi przy zagadnieniach projektowania testowanej rury wirowej.
3. Autor rozprawy ocenił krytycznie model temperatur granicznych zaproponowany przez Simõesa-Moreirę (2010), przy czym główną przesłanką do krytycznej oceny modelu jest nierealistyczna ocena granicznej temperatury zimnego końca. Autor zaproponował własny model przedstawiony w Rozdziale 4 jako model alternatywny, wskazując przy tym, że także dotyczy on oceny temperatur granicznych. Zagadnienie to ma jednakże w moim przekonaniu charakter dyskusyjny, bowiem model zaproponowany przez Simõesa-Moreirę (2010) oparty jest na analizie produkcji entropii i w związku z tym dotyczy oceny granicznych wartości temperatury wynikających ze spełnienia II Zasady Termodynamiki. Z tej racji formułuje się w tymże modelu nierówności kryterialne, nie oceniając realności uzyskania granicznych wartości temperatury. W przypadku własnego modelu zaproponowanego przez Autora rozprawy w Rozdziale 4 – oparty jest on na I Zasadzie Termodynamiki, jest to bowiem model bilansowy. Zakładając sprawności procesów sprężania i rozprężania, model ten powinien zatem formułować wprost predykcję efektów termicznych, nie zaś nierówności kryterialne. Co więcej, uzyskany materiał eksperymentalny daje szansę na wykorzystanie zaproponowanego modelu do zaproponowania relacji wiążących sprawności procesów sprężania i rozprężania tak, aby mógł on się stać potencjalnie narzędziem do oceny efektów termicznych działania rury wirowej dla geometrycznie podobnych rur wirowych, na co nie zwrócono w rozprawie uwagi.
  4. W zaproponowanym w Rozdziale 4 modelu nie bierze się przy bilansowaniu pod uwagę energii kinetycznej, zaś wyłącznie entalpię, co może potencjalnie mieć znaczenie w przypadku oceny parametrów końca procesu ekspansji (stan 2). Należałoby dokonać analizy zasadności takiego podejścia.
  5. Model numeryczny opracowany w Rozdziale 3 zastosowano tylko dla jednej geometrii rury wirowej i tylko dla jednego punktu pomiarowego, w związku z czym uzyskany materiał nie pozwala na formułowanie ogólniejszych wniosków dotyczących dokładności predykcji efektów termicznych działania rury wirowej.
  6. W Rozdziale 4 przy prezentacji modelu numerycznego wskazano na zastosowanie siatki numerycznej typu *high-Re*. Pomimo podejmowanych zabiegów - uzyskano stosunkowo wysokie wartości tego parametru wynoszące od 20 do 66. Należałoby wskazać, czy uzyskany zakres zmienności parametru  $y^+$  można uznać za zadowalający z punktu widzenia predykcji struktur przepływu w obszarze przyściennym.
  7. W Rozdziale 2 rozprawy zamieszczono wyniki badań eksperymentalnych, jednakże w sposób bardziej szczegółowy przeanalizowano wyniki jedynie dla największej wartości stosunku długości do średnicy, tj. 45.58. Modelowanie numeryczne rury wirowej zrealizowano z kolei dla przypadku najmniejszej wartości stosunku długości do średnicy (tj. 15.03), zaś dla tego przypadku nie przeanalizowano dokładniej uzyskanej charakterystyki pracy rury wirowej. Nie jest także zrozumiałe, dlaczego nie przedstawiono graficznie charakterystyk pracy rury wirowej dla pozostałych wartości stosunku długości do średnicy.
  8. W Rozdziale 2.3.3 rozważa się zagadnienie niezbilansowania energetycznego rury wirowej, co graficznie zaprezentowano na Rys. 2.11 dla przypadku rury o stosunku długości do średnicy 45.58. Problem ten mógłby być znacznie precyzyjniej rozważony,



- gdyby dokonano oszacowania niepewności pomiarowej wydajności grzewczej oraz chłodniczej badanej rury wirowej (zwanych na Rys. 2.11 strumieniami entalpii). Wówczas - porównując niezbilansowanie z niepewnością pomiarową, można dokonać oceny przyczyn takiego niezbilansowania. Nie jest także zrozumiałe, dlaczego tego efektu nie oceniono dla pozostałych przypadków badanych rur wirowych, tj. dla innych wartości stosunku długości do średnicy.
9. W Rozdziale 1.1.2, str. 12 – stwierdza się, że kształt zaworu regulacyjnego nie ma istotnego wpływu na efekt rozdziału termicznego. Znajdują się jednakże prace wskazujące na efekt wpływu kształtu tego zaworu, np. ostatnio opublikowana praca: Qyyum i in., Vortex tube shape optimization for hot control valves through computational fluid dynamics, International Journal of Refrigeration, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.02.014>.
  10. W Rozdziale 2.2 wskazano na wahania ciśnienia sprężonego powietrza dostarczanego do napędu rury wirowej. Należałoby oprócz wahań strumienia masy wskazać na poziom wahań ciśnienia zasilającego dysze rury wirowej. Ponadto z danych zamieszczonych w Tabelach 2.1 do 2.5 wynika, że badania prowadzone były dla różnych temperatur powietrza zasilającego w przedziale od 18.6 do 26.6 °C. Należałoby ocenić, czy wskazane zmiany tych temperatur mogły mieć również wpływ na pracę rury wirowej.
  11. W Rozdziale 2.3.1 stwierdzono, że występuje maksimum przyrostu temperatury po stronie gorącego końca, co ma być obserwacją odmienną od opisywanych w literaturze. Stwierdzenie to należałoby jednakże uściślić, gdyż w literaturze są dostępne liczne prezentacje badań wskazujących na maksimum przyrostu temperatury na gorącym końcu i spadku temperatury na końcu zimnym dla określonych stopni rozdziału.
  12. W Rozdziale 1.1.4 dyskutowane są krytycznie cztery różne mechanizmy fizyczne dotyczące efektu rozdziału termicznego. W przypadku mechanizmu określanego przez Autora jako „tarcie płynu” nie wskazuje się precyzyjnie na przesłanki przemawiające przeciw temu mechanizmowi. Warto byłoby także wskazać na podstawie materiału uzyskanego z modelowania numerycznego (Rozdział 4), czy mechanizm ten może także być brany pod uwagę jako hipoteza alternatywna.
  13. W Rozdziale 1.1.2, str. 10 – znajduje się następujące stwierdzenie: „Dysze o niewielkim polu przekroju przyczyniają się do znacznego spadku ciśnienia w samej dyszy prowadząc tym samym do niskich prędkości stycznych płynu poza dyszą”. Stwierdzenie to wymagałoby dodatkowego komentarza ze strony Autora, bowiem dotyczy zagadnienia o złożonym charakterze, gdyż z punktu widzenia gazodynamiki nie ma bezpośredniego związku pomiędzy średnicą dyszy a prędkością wylotową z dyszy, zaś spadek ciśnienia w rozważanym przypadku nie jest zależny od średnicy dyszy. Najprawdopodobniej rozważanie to dotyczy sytuacji, w której z racji uzyskania określonej wydajności chłodniczej – stawia się warunek wprowadzenia założonego strumienia masy powietrza.

## VI. 2. Uwagi porządkowe

Należy podkreślić staranne przygotowanie rozprawy doktorskiej pod względem edytorskim. Zwraca uwagę przejrzystość tekstu, a także wysoka jakość rysunków. Poniżej zawarte uwagi nie wpływają na moją jednoznacznie bardzo wysoką ocenę rozprawy i mają w dużej mierze charakter sugestii, które pozwalam sobie wypunktować mając na uwadze potencjalne wykorzystanie materiału zawartego w rozprawie w dalszych publikacjach Doktoranta.

- W Rozdziale 1.1.1, str. 4 – wskazuje się na zaletę w postaci czystości strugi (brak zanieczyszczenia olejem z kompresora). W rzeczywistej eksploatacji rury czystość ta jest

względna, zależy bowiem ona od zastosowanego systemu sprężania gazu i układu oczyszczania sprężonego gazu.

- W Rozdziale 4.2 dokonano analizy pracy komercyjnej rury wirowej firmy Vortec. Należałoby wskazać konkretny typ rury dobranej do analizy.
- W Tabeli 3.4 zamieszczono procentowy błąd predykcji temperatury, czego należałoby unikać w przypadku wielkości, której wartość zależy przecież od przyjętej skali; powinien być zatem podany błąd w jednostce temperatury.
- W rozprawie nie zamieszczono rysunku złożeniowego zaprojektowanej rury wirowej, który pozwoliłby na łatwiejszą identyfikację cech geometrycznych tego urządzenia.
- Rys. 1.11, należałoby zastosować na tym rysunku opisy w języku polskim.
- Dane bibliograficzne następujących pozycji wymagałyby doprecyzowania: 73, 77, 81, 90, 119, 136, 139. W wielu pozycjach w zestawieniu bibliografii występują ponadto literówki w postaci braku wielkich liter w tytułach czasopism oraz nazwie efektu Ranque-Hilscha.

## VII. Uwagi końcowe

Praca jest starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. W pracy zamieszczono w niej wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami przepływowymi zachodzącymi w rurze wirowej. Uwagi te nie pomniejszają wysokiej wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.

## VIII. Wniosek do Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą istotny wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla zagadnień badawczych termodynamiki i mechaniki płynów. Wymaga szczególnego podkreślenia fakt opracowania analizy w sposób bardzo kompleksowy. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim tak pod względem zakresu rzeczowego, jak i wysokiemu poziomowi oryginalności osiągnięć poznawczych oraz metodycznych. W moim przekonaniu Doktorant opanował doskonale warsztat pracy naukowej zarówno w zakresie badań eksperymentalnych, jak również modelowania analitycznego i zaawansowanego modelowania numerycznego, co jest rzadko spotykaną okolicznością. Doktorant posiada w dorobku artykuł opublikowany w prestiżowym czasopiśmie naukowym. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Bargiela spełnia wymagania Art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Energetyka.

*Dzys. Mramor*