

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Chomiuka  
pt. „ Analiza wpływu parametrów geometrycznych elementu odprowadzenia  
cieczy na parametry pracy pompy z wirnikiem rurowym”

Promotor: dr hab. inż. Janusz Skrzypacz

Promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Szulc

### 1. Formalna podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma W10/D/60/2022 zleconego przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 15 lipca 2022 roku i umowy o dzieło nr 21/07/PRR/2022.

### 2. Charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do oceny praca doktorska poświęcona jest bardzo ważnej i aktualnej problematyce związanej z poszukiwaniem odpowiedzi na pytania dotyczące poprawy efektywności realizowanych procesów ciepłno-przepływowych w systemach pompowych eksploatowanych w obszarach przemysłowym i komunalnym. Rozprawa obejmuje 174 strony, zawarte w dziewięciu rozdziałach uzupełnionych literaturą. Pracę rozpoczyna streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykaz ważniejszych symboli i indeksów. W następnej kolejności, autor, prezentuje osiem rozdziałów tematycznych stanowiących istotę rozprawy i kończy ją podsumowaniem oraz wykazem cytowanej literatury. Na końcu pracy zamieszczono informacje o źródle współfinansowania realizowanych prac: „Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 444”.

W rozdziale pierwszym autor prezentuje miejsce pomp wirowych wśród innych maszyn sprężających, co rozszerzyć można na wszystkie maszyny wirnikowe. Pompy są jednymi z najczęściej wykorzystywanych maszyn w różnych gałęziach przemysłu oraz w znacznej części w obszarach zastosowań komunalnych. Potwierdzają to cytowane w rozprawie raporty [1,2] z roku 2020, a odnoszące się do prognoz rozwoju tego typu maszyn w najbliższych latach. Autor wskazuje na różne techniki analizy badawczej jakie stosowane są współcześnie i wskazuje metody numeryczne CFD w obszarze transportu masy, pędu i energii oraz analiz wytrzymałościowych jako bardzo dobre źródło informacji. Podniesiony we wprowadzeniu aspekt unormowań prawnych w postaci dyrektywy UE 547/2012 wskazuje na konieczność prowadzenia prac badawczych pozwalających na jej spełnienie przez produkowane po 2015 roku pompy do wody czystej. Takie rozporządzenia w obszarze maszyn przepływowych są coraz częstsze, co wpisuje się w politykę ograniczania zużycia

energii. Podobne rozporządzenie o nr 2009/125/EC odnoszące się do wentylatorów wymusza podobną relacje pomiędzy sprawnością a mocą doprowadzaną do maszyny wirnikowej. Ponieważ pompy rurowe stanowią realną alternatywę dla współcześnie eksploatowanych pomp odśrodkowych, konieczność prowadzenia prac badawczych nad nimi może doprowadzić do zwiększenia ich stosowalności i konkurencyjności w coraz to nowych aspektach technicznych. Zrealizowane do tej pory, nieliczne, prace oparte na opatentowanej przez prof. Janusza Skrzypczaka konstrukcji potwierdzają potencjalne obszary zastosowania pompy z wirnikiem rurowym w np. lotnictwie, przemyśle chemicznym, rolnospożywczym i innych. Należy zaznaczyć, że to Politechnika Wroclawska jest obecnie centrum badań nad nowymi pompami.

Rozdział drugi poświęcony jest analizie stanu wiedzy w odniesieniu do wolnobieżnych pomp odśrodkowych. W mojej ocenie bardzo cennych jest rysunek 2.1, na którym punktem zaznaczono przybliżony obszar pracy (punkt pracy) w stosunku do maksymalnej sprawności (punkt znamionowy). Taki radykalnie odmiennie od parametrów projektowych maszyny obciążenie pompy może wystąpić w warunkach rzeczywistej eksploatacji pomp, a równocześnie stwarza odmiennie warunki przepływowe rzutujące na sprawność a nierzadko możliwość jej użytkowania. Autor prezentuje koncepcje wirnika rurowego w odniesieniu do otworowego, które można by skonfrontować z klasycznymi wirnikami promieniowymi odśrodkowymi. Transport płynu w wirniku rurowym ma radykalnie inny charakter niż w klasycznym wirniku promieniowym. Zważywszy, że wraz ze wzrostem promienia rośnie powierzchnia poprzeczna strugi, w wirniku promieniowym, dochodzi do konwersji energii kinetycznej w ciśnienie. Efektem tego jest obniżenie się prędkości, co wpływa na kinematykę ruchu z wszystkimi tego konsekwencjami. W wirniku rurowym do takich zaburzeń prędkości nie dochodzi, co ułatwia organizację przepływu płynu i tym samym optymalizację pod kątem minimalizacji strat. Tematem pracy jest wpływ systemu odprowadzenia płynu z wirnika na jego parametry pracy. System ten ma istotny wpływ na generowane straty przepływu o charakterze liniowym i miejscowym, a tym samym na sprawność maszyny sprężającej. Autor ponadto omówił w tym rozdziale wyniki analiz obliczeniowych kolektorów koncentrycznych oraz spiralnych, a ponadto dyfuzory wylotowe oraz rolę i charakterystykę elementów tworzących system odprowadzania płynu z wirnika.

Rozdział trzeci poświęcony jest badaniom wstępnym. Na początku autor trafnie zauważa, że postępowanie przy projektowaniu pomp z wirnikami rurowymi nie musi przebiegać zgodnie z regułami stosowanymi przy tworzeniu nowych konstrukcji pomp z wirnikami promieniowymi odśrodkowymi. W podrozdziale 3.1.1 przedstawiono zdjęcia pompy modelowej, której geometria w postaci: rysunku technicznego, bryły 3D, z wygenerowaną następnie siatką geometryczną pozwoliły na przeprowadzenie wstępnych obliczeń i optymalizację. W rozdziale tym analizie poddano zastosowane we wstępnej analizie modele turbulencji oraz zaprezentowano stanowisko badawcze wykorzystywane do walidacji uzyskiwanych wyników numerycznych. Wnioski wynikające z przedstawionej analizy wstępnej potwierdzają zasadność użycia opisanego sposobu analizy do weryfikacji tezy rozprawy.

W rozdziale czwartym autor przedstawia tezę pracy, w której stawia pytanie co do możliwości wytypowania parametrów geometrycznych pozwalających na analizę i optymalizację

cję konstrukcji pompy z wirnikiem rurowym oraz systemem spiralnym lub koncentrycznym służącym do odprowadzenia płynu. W celu realizacji tego zadania autor zaproponował 9 etapów. Obejmują one: studia literaturowe, badania wstępne, analizę wymiarową, budowę stanowiska badawczego, opracowanie procedur badawczych, realizację badań, analizę wyników badań, opracowanie koncepcji geometrycznej systemu odprowadzania płynu, walidację oraz prezentację wyników symulacji.

Rozdział piąty, to prezentacja analizy wymiarowej zmierzającej do uzyskania opisu matematycznego w postaci równań o charakterze fizycznym. Takie ujęcie zagadnienia umożliwia analizę wielkości fizycznych pod kątem oczekiwanych wyników pozyskiwanych z obserwacji oraz badań eksperymentalnych. Autor opracował formuły dla kanału koncentrycznego oraz spiralnego.

W rozdziale szóstym autor przedstawia plany realizacji badań eksperymentalnych osobno dla kanału koncentrycznego i spiralnego.

Rozdział siódmy dysertacji to badania zasadnicze wykonane przy użyciu kodu CFD-Ansys 16.0, wykorzystujący opracowany model geometryczny oraz schemat obliczeniowy. Wykonano obliczenia numeryczne dla przypadku niestacjonarnego przy strumieniu objętości przepływającego płynu  $4,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . Pozwoliło to na wyznaczenie optymalnych parametrów odpowiadających maksymalnej wysokości podnoszenia pompy, a tym samym maksymalnej sprawności. Kolejne symulacje numeryczne realizowano dla zmieniających się strumieni objętości. W kolejnym kroku wykonano analizę statystyczną wyników badań w odniesieniu do współczynników zmienności oraz współczynnika determinacji, co umożliwiło oszacowanie błędów. Jednym z głównych osiągnięć autora jest wykonanie analizy określającej wpływ geometrii analizowanych systemów odprowadzenia płynu na osiągnięte wysokości podnoszenia pompy oraz sprawności. W podrozdziałach 7.3.1 i 7.3.2 autor zaprezentował w formie graficznej wyniki w zakresie zmian wartości średnich: prędkości i ciśnienia całkowitego oraz parametrów opisujących turbulencje przepływu w postaci kinetycznej energii turbulencji. Zamieszczone rysunki prezentują wyniki w postaci rozkładów pól wartości poszukiwanych oraz wektorów prędkości w płaszczyznach kontrolnych: bazowych i optymalnych. Zważywszy na fakt, zrealizowania przez autora zaplanowanych analiz numerycznych umożliwiło to uzyskanie uogólnionych wyników i wniosków, co pozwoliło na opracowanie wytycznych projektowych dla koncentrycznego oraz spiralnego kanału zbiorczego.

W rozdziale ósmym zaprezentowano wyniki walidacji rezultatów obliczeń numerycznych z wynikami badań eksperymentalnych. Na wykresach zbiorczych zestawiono podstawowe charakterystyki ilościowe głównych parametrów charakteryzujących pompy. Porównano ze sobą wyniki obliczeń numerycznych z wynikami obserwacji dla płaszczyzn bazowych oraz optymalnych. Umożliwiają one wskazanie obszarów maksymalnych sprawności pompy, a tym samym minimalizacji zużycia energii w odniesieniu do ilości transportowanego strumienia objętości płynu.

Rozdział dziewiąty to podsumowanie, w którym autor zebrał najważniejsze spostrzeżenia zgromadzone podczas badań oraz odpowiedział na stawianą w dysertacji tezę badawczą. Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie szesnastu wniosków o charakterze poznawczym oraz analitycznym odnoszącym się do badanych systemów odprowadzenia płynu z

pomp z wirnikami rurowymi. W podsumowaniu autor wskazuje na możliwe dalsze kierunki badań uwzględniających zmiany wielkości geometrycznych, warunków pracy pompy oraz współpracy wirników w ramach konstrukcji pompy wielostopniowej. Zadania szczegółowe zrealizowane w pracy są adekwatne do głównego celu rozprawy zrealizowanej przez autora.

Rozprawę podsumowuje wykaz cytowanej literatury obejmującej: 48 artykuły naukowe oraz materiały z wystąpień konferencyjnych, 40 opracowań monograficznych, 3 raporty, 3 rozporządzenia i normy oraz 3 patenty. Wykorzystane w pracy publikacje użyto poprawnie, stanowią kompletną całość i pozwalają na realizację zakładanych celów rozprawy mających uzasadnić stawianą tezę w dysertacji.

### 3. Komentarze oraz spostrzeżenia wymagające komentarza autora

Rozprawę rozpoczyna wykaz ważniejszych oznaczeń oraz indeksów, który stanowi istotną pomoc w zrozumieniu i analizie prezentowanych treści. Pojawiają się jednak w pracy symbole nie znajdujące się w wykazie co w nieznacznym stopniu utrudnia analizę. Przykładem takim może być symbol „ $\Omega$ ” na rysunku 2.31 ze strony 47. Zrozumiałe jest, że część ilustracji pochodzi z innych prac wstawionych do rozprawy w postaci skanów i zmiana symboliki jest niemożliwa. Należało by w takich okolicznościach uzupełnić tekst opisu rysunku o identyfikację symboli z poza wykazu symboli i indeksów. Podobna sytuacja odnosi się do indeksów pochodzących ze wzmiankowanych źródeł. Przykładem mogą być indeksy „N” i „z” z rysunku 2.27 ze strony 42. Niedociągnięcia te nie utrudniają istotnie odbioru zamieszczonych treści dla osób zaznajomionych z analizowaną tematyką rozprawy. W całej rozprawie pojawiają się zwroty żargonowe, takie jak np. „wydajność w  $\text{m}^3/\text{h}$  lub  $\text{m}^3/\text{s}$ ”. Opisywana wielkość to strumień objętości. W przypadku odniesienia wielkości fizycznych do czasu np.: masy, objętości, energii, pracy, ciepła, itd. nazwę wielkości fizycznej poprzedzamy słowem „strumień” uzyskując strumień masy, strumień objętości, strumień energii, strumień ciepła, itd. Jednostką zgodną z Międzynarodowym Systemem Miar jest w przypadku czasu sekunda, czyli odnosimy jednostkę wielkości fizycznej do sekundy a nie do godziny. W wielu przypadkach czytelniej jest użyć odniesienia do godziny z racji uzyskania po podzieleniu przez 3600 bardzo małych wartości. Poprawny zapis powinien obejmować: odniesienie do sekundy i ewentualnie podwielokrotność w formule wykładniczej o wartości ujemnej. W przypadku terminu „wydajność”, mimo, że jest to nazwa niepoprawna stosowana jest ona bardzo często. Dlatego to wydajność jest nazwą łatwiej identyfikowalną dla innych osób niż zwrot „strumień objętości”. Te drobne niedociągnięcia nie umniejszają wartości zaprezentowanego opisu w dysertacji. Na stronie 17 w pierwszej linii użyto słowa „optymalny”, co jest dyskusyjne w odniesieniu do „punktu maksymalnej sprawności”. Formalnie, zwroty „optymalne, optymalizacja, itp.” powinny odnosić się do analizy zależności matematycznej opisującej analizowane zjawisko. Punkt maksymalnej sprawności jest uzyskiwany w wyniku pomiaru maszyny lub jest zakładany na etapie projektowania maszyny. Dotyczy to również maszyn przepływowych sprężających. W moim odczuciu właściwsze było by sformułowanie „... obliczany jest dla maksymalnej sprawności maszyny przepływowej sprężającej.”

*Na niektórych rysunkach przedstawiono charakterystyki pomp dla zerowych wartości prędkości obrotowej wirnika lub zerowego strumienia objętości cieczy przepływającej przez wirnik. Taka prezentacja sugeruje, że maszyny sprężające mogą być wykorzystywane w obszarze pompiarzu lub np. istnieją mierzalne, większe od zera wartości parametrów pracy pompy przy równoczesnym braku przepływu płynu. Proszę autora o ustosunkowanie się do tej uwagi.*

Autor używa w pracy liczby podobieństwa Reynoldsa ( $Re$ ) nie podając sposobu jej obliczanie, np. rysunek 2.4 strona 19. Ponieważ liczba Reynoldsa nie jest wielkością określoną ścisłym wzorem przy jej zastosowaniu wymagane jest podanie: jaki użyto rodzaj prędkości, jaki przyjęto charakterystyczny wymiar liniowy i jaka jest wartość lepkości względnie gęstości. Uzyskany z wykresu wzór 2.1.5 jest zacytowany z pracy obejmującej badania hamulca wodnego, w którym szczeliny pomiędzy tarczami i korpusem nie muszą mieć wymiaru porównywalnego z odległościami kanałów rurowych od korpusu. Uważam, że w pracy powinna znaleźć się informacja o takich ograniczeniach w zastosowaniu tych danych literaturowych. Na stronie 29 zaprezentowano na rysunku 2.14 rozkład wektorów prędkości w m/s jak sugeruje legenda. W podpisie pod rysunkiem oraz w tekście użyto nazwy prędkość względna do określenia prezentowanych wyników. W pracy występują opisy umieszczane pomiędzy nazwą rozdziału i nazwą pierwszego podrozdziału (np. 3. Badania wstępne i 3.1. Symulacje ...). Przedstawione tam treści są nierzadko bardzo istotne z punktu widzenia wykonanej analizy lub wyciągniętych wniosków. Brak numeru podrozdziału dla takiego tekstu utrudnia odwołanie się do tych danych w dalszej części pracy. W przypadku założonych warunków analizy numerycznej (3.1.3) przyjęto kryterium zbieżności wartości średnich w kolejnych krokach iteracyjnych a nie RMS – Ransom Message Sygnał (wartości mierzone parametrów opisujących turbulencje przepływu).

*Zastosowane w analizie numerycznej funkcje uzupełniające obejmują dwurównaniowe modele turbulencji, które były testowane przez autora. W równaniach tych obok kinetycznej energii turbulencji do opisu wykorzystuje się częstotliwość struktur lub szybkość dyssypacji energii turbulencji. Jednak zgodnie z cytowanymi pracami innych autorów w tym profesora J. Elsnera [63] najlepsze efekty uzyskuje się przy bezpośrednim opisie naprężenia Reynoldsa, z których zbudowany jest tensor naprężeń turbulentnych. Modele dwurównaniowe mają swoje zastosowania i ograniczenia w różnych typach przepływu przy uwzględnieniu odpowiednich wartości stałych wbudowanych w modele. Dlaczego nie przetestowano modelu RSM - Reynolds Stress Method, który jest zaimplementowany w programie Ansys 16.0. Proszę autora o ustosunkowanie się do tej uwagi.*

Zamieszczona formuła na  $\eta_c$  w podrozdziale 3.2.4 nie budzi moich zastrzeżeń z wyjątkiem przyjętej wartości współczynnika strat tarcia wirującej tarczy. Wartość ta zaczerpnięta została z pracy [7], czyli z badań klasycznych wirników. Na rysunku 7.4 źle sformatowano legendę, co utrudnia ocenę wyciągniętego wniosku umieszczonego nad rysunkiem. Weryfikując wyniki obliczeń numerycznych wykonano w oparciu o zbudowane stanowisko eksperymentalne. Elementy konstrukcyjne z których składają się systemy odprowadzenia cieczy wykonano metodą szybkiego prototypowania (Rapid Prototyping). Metody te w przypadku pomp ograniczają między innymi rozpuszczalność zastosowanego materiału oraz chropowatość powierzchni. Autor napisał, że powierzchnie zostały wypolerowane i zabez-

pieczone lakierem, ale nie przedstawił ilościowej miary chropowatości. Ponadto brak danych o sposobie oceny powierzchni oraz informacji, jakie powierzchnie były kontrolowane. Wadą w pracy jest brak, w wielu miejscach rozprawy, dostatecznie dokładnego i obszernego opisu analizowanych danych. Wykresy i tabele zaprezentowane w pracy w znacznej ilości posiadają bardzo ubogi komentarz. Interpretacja danych z wykresów i tablic jest z tego powodu utrudniona. Dotyczy to w szczególności rozdziałów, w których autor prezentuje wyniki własnych analiz. Zachęcam autora, aby w kolejnych opracowaniach większą wagę przyłożył do opisu: danych, wzorów, wykresów, algorytmów, itd. Takie podejście ułatwi lepsze zrozumienie nowych opracowań naukowych oraz ich jeszcze wyższą ocenę. W pełni zgadzam się z końcowymi konkluzjami. Zwracam jednak uwagę, że wyszczególnienia w rozdziale 9 zaczynają się małą lub dużą literą. Warto to w przyszłości ujednolicić w całej pracy.

#### 4. Ocena wartości merytorycznej rozprawy

W mojej opinii, struktura pracy nie budzi zastrzeżeń. Rozprawę uznaję za spójną, jej objętość za adekwatną do zakresu tematycznego i mieszczącą się w ramach przyjętych dla prac doktorskich. Autor przedstawia i komentuje wyniki uzyskane podczas analiz numerycznych i eksperymentalnych odnoszących się do nowatorskiej konstrukcji pompy z wirnikiem rurowym. Głównym osiągnięciem autora jest wyznaczenie parametrów geometrycznych w przyjętym zakresie zmian strumienia objętości transportowanej cieczy w odniesieniu do systemów odprowadzenia czynnika roboczego z za wirnika. Efektem użytecznym jest osiągnięcie wysokiej sprawności pompy.

Podjęte przez autora zadanie jest oryginalne i istotne zarówno dla wielu branż przemysłowych oraz sektora komunalnego. Nowatorskie konstrukcje, w tym konstrukcja pompy z wirnikiem rurowym stanowią ważny kierunek badań prowadzonych na Politechnice Wrocławskiej. Uogólnione wnioski uzyskiwane w ciągu lat badań mogą prowadzić do opracowania procedur projektowych podobnych jak w eksploatowanych obecnie pompach. Badania takie, pozwalające na zwiększenie różnorodności konstrukcji, w połączeniu z doświadczeniami eksploatacyjnymi umożliwią wskazanie obszaru stosowalności pomp z wirnikami rurowym wyposażonymi w kolektory spiralne lub koncentryczne. Praca pozwoliła na osiągnięcie efektów użytecznych. Do najważniejszych zaliczam: przegląd literatury w zakresie spójnym z przyjętą koncepcją pompy rurowej, opracowanie dedykowanych procedur obliczeniowych w programie Ansys, opracowanie algorytmu oceny ilościowej wyników analiz numerycznych zweryfikowanych z danymi eksperymentalnymi oraz opracowanie wytycznych projektowych pozwalających na osiągnięcie przez nowe konstrukcje wysokich sprawności całkowitych.

Autor wykazała się w pracy umiejętnością: stawiania tez, formułowania celów badawczych, wykazał się umiejętnościami tworzenia algorytmów obliczeniowych oraz budowy stanowisk badawczych w oparciu o oczekiwane wyniki prac mających potwierdzić lub zanegować słuszność stawianej tezy. Autor rozprawy udowodnił, że w sposób wyważony w oparciu o dane literaturowe, wyniki obliczeń numerycznych i eksperymentalnych oraz własne interpretacje danych potrafi udowodnić stawiane tezy i formułować wnioski o charakterze użytecznym.

Uważam, że powyższe argumenty uprawniają mnie do stwierdzenia, że autor osiągnął założone w rozprawie cele i wykazała się bardzo dobrym poziomem przygotowania merytorycznego, umiejętnością prowadzenia analiz oraz poprawnym wnioskowaniem w oparciu o ich wyniki.

## 5. Podsumowanie

Moim zdaniem rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartłomieja Chomiuka stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, potwierdza wiedzę autora w obszarze maszyn przepływowych w dyscyplinie **budowy i eksploatacji maszyn**.

Przedstawioną do oceny pracę doktorską oceniam pozytywnie pomimo drobnych błędów redakcyjnych i merytorycznych, które nie umniejszają jej ogólnej wartości.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Analiza wpływu parametrów geometrycznych elementu odprowadzenia cieczy na parametry pracy pompy z wirnikiem rurowym” autorstwa mgr inż. Bartłomieja Chomiuka spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.). Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony, co może stanowić podstawę do nadania jej Autorowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie: **budowa i eksploatacja maszyn**, po spełnieniu pozostałych warunków określonych w przywoływanej Ustawie.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

  

---

*(Jarosław Bartoszewicz)*

