



Wroclaw 23-04-2022 r.

Dr hab. inż. Janusz Skrzypacz, prof. uczelni  
Katedra Konwersji Energii  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Politechnika Wroclawska  
ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27,  
50-370 Wroclaw

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Marka Szlagi  
pt. „Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej  
oraz sprawność pompy wirowej”**

**Promotor:  
dr hab. inż. Krzysztof Karaśkiewicz**

Recenzję rozprawy doktorskiej sporządzono na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. Tomasza Wiśniewskiego, wyrażoną w piśmie RND-IŚGiE/23/2022 z dnia 01 marca 2022 r.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Szlagi pt. „Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej oraz sprawność pompy wirowej” stwierdzam, że została ona zakwalifikowana właściwie do dyscypliny naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
www.iep-qaa.org

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wroclaw

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



## 1. Opis rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 202 strony i składa się ona ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu oznaczeń oraz 8 rozdziałów i spisu literatury, w którym umieszczono 76 pozycji bibliograficznych.

Dwa pierwsze rozdziały to wprowadzenie w tematykę pracy oraz omówienie celów i tezy pracy. Główna teza została sformułowana w brzmieniu: „Przy takim samym stopniu zmniejszenia hydraulicznej siły osiowej, łopatkę odciążającą o pojedynczej krzywiznie charakteryzującą się mniejszymi stratami niż powszechnie stosowane proste łopatki promieniowe” jest w dalszej części pracy skutecznie udawadniania.

Rozdział 3 stanowi przegląd stanu wiedzy z zakresu zjawiska powstawania siły osiowej w pompie wirowej oraz jej wyznaczania. Natomiast rozdział 4 dotyczy teorii pracy oraz metod projektowania żeber odciążających. Autor wykorzystał wiele publikacji (ok 30) z przed 35 lat. Nie jest to jednak zarzut z mojej strony, gdyż mam świadomość iż obecnie powstaje bardzo mało wartościowych prac z zakresu pomp wirowych, a większość wiedzy na której obecnie bazujemy pochodzi z lat wcześniejszych. Niniejsze rozdziały stanowią doskonałe kompendium wiedzy, dotyczące rozpatrywanego zagadnienia.

Rozdziały 5 i 6 potraktowałbym jako „badania wstępne”, mające na celu opracowanie aparatu obliczeniowego, jego wstępną weryfikację oraz wykonanie badań mających potwierdzić słuszność koncepcji stosowania łopatek odciążających krzywoliniowych w stosunku do klasycznych, promieniowych. Autor przedstawił stanowisko badawcze ITC PW oraz metodykę wykonywania pomiarów. Następnie przedstawił model CFD, zgodny z geometrią przedstawionego stanowiska. Wyniki obliczeń CFD zostały porównane z wynikami badań doświadczalnych. W kolejnym kroku zweryfikowany model CFD został użyty do analizy pracy wirującej tarczy z różną geometrią układów łopatkowych. Wyniki zostały przedstawione tabelarycznie oraz graficzne i dogłębnie przeanalizowane. Dopełnieniem tych prac jest porównanie wartości współczynników wirowania, wyznaczonych analitycznie, numerycznie i eksperymentalnie.

Rozdział 7 – w moim odczuciu – stanowi najważniejszą część recenzowanej dysertacji. W tej części pracy autor skupił się na badaniach prowadzonych już na jednostopniowej pompie wirowej. Autor zaprojektował i wykonał stanowisko



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
www.iep-qa.org

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

Skup



badawcze, które zostało wykorzystane do pomiarów energetycznych oraz siły osiowej układów przepływowych w różnej konfiguracji łopatek odciążających. W następnym kroku autor opisał model przepływowy CFD pompy, wykorzystywanej w badaniach eksperymentalnych. Wyniki numeryczne podlegały walidacji. Zweryfikowany model CFD został użyty do wykonania głównych badań pracy. Autor przeanalizował 36 różnych wariantów łopatek odciążających, uwzględniając dodatkowo wpływ chropowatości powierzchni. Uzyskane wyniki zostały przedstawione tabelarycznie i graficznie, a następnie przeanalizowane. Finalne konkluzje znalazły się w Podsumowaniu oraz rozdziale 8 „Wnioski końcowe.

## 2. Merytoryczna Ocena rozprawy

### 2.1 Ocena wyboru tematu rozprawy

Obecnie pompy są maszynami energetycznymi, które zużywają ok 30% energii produkowanej w światowych gospodarkach, tak więc poprawa sprawności procesu pompowania chociaż o 1 % może mieć wymierne efekty finansowe jak również środowiskowe. Można więc stwierdzić, iż każda praca naukowa, która prowadzi do takiego celu ma głęboki sens.

W przedstawionej mi do recenzji dysertacji, autor koncentruje się na problematyce równoważenia naporu osiowego w pompie wirowej. Jest to zagadnienie trudne i złożone, o dużym znaczeniu praktycznym. W praktyce inżynierskiej samo oszacowanie siły osiowej nastęrcza wiele problemów, co często prowadzi do znacznego przewymiarowania węzłów łożyskowych.

Autor rozprawy przedstawia wieloaspektowe podejście do rozwiązania problemu, poszukując kompromisu pomiędzy dwoma kryteriami: minimalizacja siły osiowej oraz maksymalizacja sprawności. **W świetle przytoczonych powyżej argumentów, uważam że podjęcie zaproponowanego tematu jest zasadne, a wyniki mogą mieć duże znaczenie praktyczne.**



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
[www.iep-qa.org](http://www.iep-qa.org)

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

[www.pwr.edu.pl](http://www.pwr.edu.pl)

REGON: 00001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

Skry



## 2.2 Ocena sposobu realizacji pracy

Do rozwiązania postawionego problemu naukowo-technicznego, autor zastosował złożoną metodykę badawczą. Badania zostały podzielone na dwie grupy: „badania wstępne” – rozdziały 5 i 6 oraz „badania zasadnicze” – rozdział 7. W obu przypadkach zastosowano zarówno podejście eksperymentalne jak i modelowanie numeryczne CFD.

Takie podejście wydaje się być wzorcowe, gdyż prace eksperymentalne pozwalają wyznaczyć główne parametry pracy pampy, niezbędne do oceny skuteczności analizowanych rozwiązań oraz będące punktem wyjścia do walidacji modeli numerycznych. Natomiast modele numeryczne (wirtualne laboratorium) pozwalają przeanalizować wiele wariantów rozwiązań, dostarczając znacznie bogatszej informacji odnośnie zjawisk przepływowych występujących w badanych obiektach.

Stwierdzono pewne niedociągnięcia w realizacji badań, które zostały szczegółowo omówione w rozdziale 2.3 niniejszej recenzji.

## 2.3 Uwagi krytyczne i pytania

### Uwagi główne

- 1 Wybór modelu turbulencji SST  $k-\omega$  nie budzi wątpliwości, chociaż warto by było sprawdzić, czy inne modele nie zapewnią podobnych wyników w krótszym czasie i przy mniejszych wymaganiach odnośnie zasobów obliczeniowych. Nie mniej jednak, dla modelu turbulencji SST  $k-\omega$ , aby właściwie zamodelować tzw. „efekt ścianki”  $y^+$  na ścianie powinien być mniejszy od 1. W takim kontekście nie zrozumiałe są wartości w tabeli 5.1, gdzie parametr  $y^+$  dla badanych typów siatek wynosi 47 i więcej. Taka wartość pojawia się również na stronie 148.
- 2 Siatka obliczeniowa pokazana na rys. 5.2 oraz rys. 6.5 budzi moje wątpliwości. Zgodnie ze sztuką obliczeń numerycznych, stosunek szerokości dwóch sąsiednich elementów siatki nie powinien przekraczać 1.2. Na zacytowanych rysunkach można zauważyć, jak w badanej szczelinie elementy z „boundary layers” przechodzą bezpośrednio w jeden szeroki element, modelujący niemal całe „jądro przepływu”.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
[www.iep-gaa.org](http://www.iep-gaa.org)

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

[www.pwr.edu.pl](http://www.pwr.edu.pl)

REGON: 00001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

Shy



- 3 Aby wyznaczyć minimalną liczbę elementów siatki, przy której rozwiązanie przestaje zależeć od ilości użytych elementów, autor przeprowadził „grid independence test”. Analizując jednak rys. 5.3 i rys. 7.27 można zauważyć, że zaznaczone punkty leżą na jednej prostej. Można więc zasugerować, że optymalna siatka będzie miała znacznie mniej elementów niż autor przeanalizował w swojej pracy. Mówiąc innymi słowy, autor nie wyłapał punktu stabilizacji wyników.
- 4 Jak autor wyznaczył średnią wartość współczynnika wirowania. Mam na myśli jakie ciśnienia brał do obliczeń (odczytane w punkcie, uśrednione po powierzchni, itp.)?
- 5 W rozdziale 6 autor opisuje badania eksperymentalne, cytując pozycję literaturową [47]. Z tekstu przytoczonego rozdziału, nie jest dla mnie jasne co autor zrobił osobiście, a co zaczerpnął z pozycji [47].
- 6 W całej pracy nie znalazłem informacji odnośnie zastosowanych schematów dyskretyzacji dla poszczególnych równań w modelach CFD.
- 7 W rozdziale 7.3 autor pisze, iż odwzorował geometrię wirnika zamkniętego na podstawie pomiarów. Moim zdaniem nie da się tego zrobić dobrze bez zniszczenia wirnika. Tu nasuwa mi się pytanie, dlaczego autor nie zaprojektował wirnika od zera, a następnie go nie wydrukował na przykład metodą SLS, zapewniającą przy tej mocy wystarczającą wytrzymałość oraz akceptowalną cenę. Przy takim podejściu autor miał by gwarancję, że modelowana i badana geometria są identyczne.
- 8 Brak informacji graficznej odnośnie siatki i warunków brzegowych modelu opisanego i przedstawionego w rozdziale 7. Z modelu geometrycznego wynika, że zamodelowano również uszczelnienie szyjki wirnika. Jeśli tak, to jaka jest wysokość szczeliny i jaka siatka została wygenerowana w tym obszarze oraz sąsiadującym ze szczeliną? Jeśli szczelina nie była modelowana, to jak uwzględniono sprawność wolumetryczną we wzorze 7.3?
- 9 Autor pisze, że przeanalizował 36 różnych wariantów łopatek odciążających. Brak jest jednak komentarza wg jakich kryteriów przyjęto parametry geometryczne tychże wariantów. Moim zdaniem autor powinien tu zastosować jedną z metod planowania eksperymentu.
- 10 Według mnie, kluczowe wyniki to rysunki 7.36 do 7.38. Jednak ze względu na bardzo zbliżone kształty markerów oraz ich natłok, te wykresy są praktycznie nieczytelne. Sugerowałbym, aby dołożyć tabelę zbiorczą z następującymi kolumnami: (typ wirnika, wysokość podnoszenia,



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
www.iep-qaa.org

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-56-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434

skyn



sprawność, siła osiowa, współczynniki kręcenia  $k_I$ ,  $k_{II}$ , moc pobierana przez łopatkę, przyrost wysokości podnoszenia).

- 11 Wniosek, że ze wzrostem prędkości obrotowej wzrosła sprawność jest oczywisty, gdyż rośnie również wydajność pompy.
- 12 Wzrost „efektu pompowania” dla łopatek prostych wynika – moim zdaniem – głównie z dużej wartości kąta  $\beta_2 = 90$  stopni. Taki kąt skutkuje dużym udziałem energii kinetycznej, którą następnie trzeba będzie przekonwertować na energię potencjalną w dyfuzorze wylotowym. Czy autor analizował udział tej energii kinetycznej oraz sprawność tej przemiany?

## Uwagi poboczne i porządkowe

1. Wartości ciśnień na legendzie rysunku 6.7 są tak gęsto upakowane, że stają się nieczytelne.
2. Strona 55 – parametr chropowatości  $R_a$  powinien mieć jednostkę.
3. Rozdział 2. Brakuje mi zdefiniowania głównego celu pracy (na przykład zbadane wpływu zakrzywionych łopatek odciążających na wartość siły oraz sprawności pompy wirowej). Cele wymienione w 2.1 bardziej brzmią jak „Zakres pracy lub „Zadania do wykonania”. Punkt 2.3 „Zakres pracy” powinien raczej nosić tytuł „Zawartość pracy”, gdyż zawiera streszczenie poszczególnych rozdziałów. Tezy przedstawione w rozdziale 2.2 bardziej brzmią jak wnioski, z czego pierwsza jest oczywista i – moim zdaniem – powinna być usunięta.
4. Autor pozostawił wiele samotnych liter na końcu wierszy.
5. Generalnie nie stwierdziłem błędów ortograficznych czy literowych. Można jednak znaleźć błędy interpunkcyjne.

## 2.4 Ogólna ocena dysertacji

Przeprowadzona analiza rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Szlagi na temat. „Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej oraz sprawność pompy wirowej” pozwala na stwierdzenie, że Doktorant twórczo rozwiązał postawiony w temacie pracy problem, stosując zróżnicowany aparat badawczy – zarówno eksperymentalny jak i obliczeniowy. Wykazane uwagi i wątpliwości nie umniejszają dokonań i wkładu własnego Doktoranta. Rozprawa została opracowana niezwykle estetycznie i starannie.

*Szw*



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
www.iep-gaa.org

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Temat rozprawy jest ważny z poznawczego i praktycznego punktu widzenia. Wyniki badań oraz wnioski końcowe mogą znaleźć praktyczne zastosowanie i przełożenie na nowo projektowane lub modernizowane jednostki pompowe, poprawiając głównie ich niezawodność i energochłonność.

Z całą stanowczością mogę stwierdzić, iż autor wykazał się samodzielnością w pracy naukowej, bogatym warsztatem badawczym oraz wiedzą teoretyczną tożsamą z dyscypliną naukową w jakiej dysertacja została złożona.

### 3. Wniosek końcowy

Przedłożona mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Szlagi pt. „Wpływ łopatek odciążających na zmniejszenie hydraulicznej siły osiowej oraz sprawność pompy wirowej” jest w moim przekonaniu oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego.

Autor rozprawy doktorskiej wykazał się dużą wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie swojej dyscypliny naukowej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

**Rozprawa ta w pełni spełnia wymagania ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Janusz Skrypa



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by  
**IEP** INSTITUTIONAL  
EVALUATION  
PROGRAMME  
[www.iep-qaa.org](http://www.iep-qaa.org)

Politechnika Wroclawska  
wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

[www.pwr.edu.pl](http://www.pwr.edu.pl)

REGON: 000001614  
NIP: 896-000-58-51

Nr konta:  
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434