

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Nycz
pt. „Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na
pracę pompy wirowej o niskim wskaźniku szybkobieżności”

Promotor: dr hab. inż. Janusz Skrzypczak, prof. PWr
Promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Szulc

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie zawiadomienia z dnia 23.03.2026r. nr 10/03/D08/2026 w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka nr 388/19/RDND08/2024-2028 z dnia 18.03.2026r. oraz w zw. z art. 183 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.)

2. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do oceny dysertacja doktorska poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce związanej z optymalizacją procesów technologicznych obejmujących wykorzystanie pomp wirowych charakteryzujących się niskimi wyróżnikami szybkobieżności. Zakres zrealizowanych prac umożliwił poszerzenie wiedzy z zakresu regulacji pracy pomp promieniowych. Treść rozprawy dotyczy poszukiwania odpowiedzi na pytania związane z poprawą efektywności realizowanych procesów przepływowych w systemach pompowych wykorzystujących maszyny sprężające charakteryzujące się względnie niskimi strumieniami przetłaczanej masy odniesionej do wielkości realizowanych przyrostów ciśnienia statycznego maszyn eksploatowanych w obszarach przemysłowym oraz komunalnym.

Rozprawa obejmuje 206 strony, podzielona jest na dziewięć rozdziałów uzupełnionych literaturą. Pracę rozpoczyna spis treści wraz z wykazem oznaczeń, indeksów i skrótów poprzedzony streszczeniem w języku polskim i angielskim. W następnej kolejności, autorka, prezentuje osiem rozdziałów tematycznych, rozpoczynając od wskazania inspiracji rozpoczęcia swoich prac, poprzez analizę stanu wiedzy, tezę dysertacji oraz opis realizowanych prac badawczych: eksperymentalnych, analitycznych i numerycznych. W podsumowaniu, autorka, streściła wyniki prac wskazując na własne, autorskie osiągnięcia oraz tematykę badań, które w przyszłości mogły by stanowić rozwinięcie jej badań. Dysertację kończy wykaz 135 prac naukowych oraz podręczników stanowiących podstawę teoretyczną reali-

zowanych badań i analiz. W wykazie znajdują się dwie publikacje współautorskie doktorantki oraz publikacje promotora i promotora pomocniczego, uzasadniające powierzenie im roli opiekunów w ramach badań.

Rozprawę doktorską, w części merytorycznej, rozpoczyna opis czynników, które skłoniły autorkę do podjęcia się badań w obszarze maszyn przepływowych. Autorka analizuje maszyny sprężające, a w szczególności pompy, pod kątem zużywanej energii elektrycznej, co przekłada się na ich udział w bilansie emisyjnym CO₂ krajów. Omawia rolę dyrektywy unijnej nr 2009/125/WE jako mechanizmu możliwej kontroli nad ich energochłonnością i wskazuje na dopuszczaną rozporządzeniem Komisji UE 547/2012 niską wartość sprawności jako potencjalny obszar ich dalszego rozwoju. Autorka wskazała na konieczność ciągłego udoskonalania istniejących już konstrukcji oraz na konieczność poszukiwania nowych rozwiązań. Światowy rynek handlu pompami szacowany na ponad 40 mld USD stanowi bardzo dużego odbiorcę nowych konstrukcji, o wyższej sprawności, a tym samym niższych kosztach eksploatacyjnych. Autorka, swój obszar badań ogranicza do rozwiązań pomp wirowych z wirnikami wyposażonymi w łopatki szczelinowe charakteryzujące się niskim wyróżnikiem szybkobieżności, ze szczególnym naciskiem na poszukiwanie rozwiązań o stabilnych wartościach sprawności w szerokim zakresie strumieni masy, a nie tylko w parametrach znamionowych.

Stan wiedzy w obszarze badań, zaprezentowany w rozdziale drugim, w sposób bardzo dokładny opisuje straty energii lub mocy w elementach składowych maszyn sprężających. Przedstawiona na rys. 2.2 pogładowa charakterystyka strat w funkcji kinematycznego wyróżnika szybkobieżności jednoznacznie wskazuje na obszar największych strat gdy wyróżnik ten przyjmuje małe wartości. Dotyczy to strat wynikających z przecieku oraz tarcia w obszarach przecieków. Autorka omawia również alternatywny sposób opisu strat energii, przypisując je do poszczególnych odcinków przepływowych maszyny, czyli jego części. Ujęcie to bardzo popularne przy projektowaniu maszyn transportujących gazy pozwala na przypisanie strat i analizę w odniesieniu do wybranego elementu sprężarki, dmuchawy czy wentylatora. Wykonana analiza stanu wiedzy potwierdziła, że dla niskich wskaźników szybkobieżności (poniżej 15) brak spójnego, całościowego opisu strat z podaniem ich źródeł – mechanizmu transportu energii – oddziaływania z powierzchniami ciał stałych – wpływem kształtu tychże powierzchni na interakcje z płynem. Należy wspomnieć, że autorka wskazuje na rosnący udział badań o charakterze numerycznym w procesach projektowania i optymalizacji pomp. W swojej analizie, doktorantka, opisuje metody minimalizacji strat energii stosowane w maszynach wolnobieżnych. Należy tu zaznaczyć, że z racji niskich wartości sprawności maszyn określenie korzyści wynikających z zastosowania modyfikacji bywa trudne. Widać to dobitnie na przykładzie analizy wpływu mikro-rowków (rys. 2.21) gdy przyrosty sprawności są rzędu dokładności pomiarowych lub/i różnic uzyskiwanych dla poszczególnych geometrii. Pomocne mogą tu być metody numeryczne, które nieobarczone błędami pomiarowymi, a jedynie warunkami przygotowanej symulacji dają stabilne rozwiązania i można na ich podstawie wnioskować o ewentualnych korzyściach (rys. 2.25) wynikających z niewielkich modyfikacji kształtu. Pomijam tu kwestię dokładności samych obliczeń. Zasadnicza część przeglądu literaturowego odnosi się wirników ze szczeliną między łopatkową w zrozumieniu dzielonej cięciwy łopatki, co umożli-

liwia zmianę usytuowania krawędzi spływu pierwszej łopatki (ostrza) w stosunku do położenia krawędzi natarcia drugiej jej części (noska). W podsumowaniu przeglądu literaturowego, doktorantka, wskazuje na sześć istotnych obszarów badań względnie sfer, które w tych badaniach były pominięte w odniesieniu do wirników pomp z łopatkami dzielonymi. Wskazała na niekompletność badań eksperymentalnych oraz numerycznych, brak jest dostatecznie przekonujących danych odnośnie doboru szczeliny oraz uwzględnienia wpływu warunków eksploatacyjnych.

Na podstawie danych uzyskanych z analiz literaturowych, autorka w rozdziale trzecim rozprawy stawia tezę, że *„istnieje taka postać geometryczna łopatki szczelinowej, której zastosowanie w wirniku pompy krętnej o niskim wyróżniku szybkobieżności prowadzi do wzrostu wysokości podnoszenia i/lub sprawności”*. W celu określenia wpływu kształtu łopatki, szczeliny i ich wzajemnego położenia na charakterystykę pracy pompy autorka zaplanowała dziewięcioetapowy cykl badań. Kolejne pięć rozdziałów rozprawy to opis realizacji tych celów.

W rozdziale czwartym przedstawiono opis stanowiska pomiarowego z zamieszczonym schematem blokowym rozlokowania elementów składowych. Tabelę z wyszczególnionymi przyrządami pomiarowymi, dobranymi do eksperymentu oraz z podanymi deklarowanym przez producentów klasami dokładności, jak również parametry znamionowe silnika napędowego, przetwornicy częstotliwościowej i siłowników. Całość opisu uzupełniona jest zdjęciami instalacji badawczej, zrzutem ekranu prezentującego użytą aplikację pomiarową oraz tablicę rejestrującą wyniki pomiarów. Rozdział zawiera prezentację niezbędnych do analizy wzorów obliczeniowych i zwieńczony jest analizą niepewności pomiarowych zebranych w tabeli 4.3, a dotyczących pomiarów referencyjnych wykonanych dla wirnika z łopatką ciągłą.

W rozdziale 5, autorka prezentuje wyniki badań wstępnych dotyczących określenia wpływu wielkości szczeliny i jej usytuowania w stosunku do wzajemnego położenia ostrza i noska profili. Warianty do badań zestawiono w tabeli 5.1. Autorka prezentuje proces tworzenia łopatek na tarczy tylnej oraz ich zespalania w cały wirnik. W tabeli 5.2 zaprezentowano wyniki tych prac w postaci rysunków konstrukcyjnych oraz zdjęć wydrukowanych wirników. Całości rozdziału cechuje bardzo duża dbałość o detale umożliwiające czytającemu identyfikację różnic w kształtach i wymiarach poszczególnych wirników. Wyniki badań wstępnych nie pozostawiają żadnych wątpliwości, co do słuszności przyjęcia koncepcji stosowania łopatek dzielonych. Przedstawione na rysunkach od 5.4 do 5.6 charakterystyki potwierdzają ten fakt. O ile w obszarze niewielkich strumieni objętości (do $5 \text{ m}^3/\text{h}$) ocena jest trudna, ponieważ wynika z faktu, że moc użyteczna jest iloczynem przyrostu ciśnienia i niewielkiego strumienia objętości, przeto różnice w efektach użytecznych nie mogą być duże. Po przekroczeniu wartości $5 \text{ m}^3/\text{h}$ moc użyteczna jest wyraźnie wyższa od wyniku uzyskanego dla wirnika referencyjnego. Różnice w sprawnościach przy wyższych strumieniach dla wirników z łopatkami dzielonymi dochodzą do 4%, co w pełni uzasadnia dalsze badania zmierzające do ich optymalizacji. Równie istotne wyniki uzyskano podczas badań dla trzech różnych szerokości wirnika (tabela 5.4 oraz rysunki 5.12-5.17).

Rozdział szósty, to prezentacja wyników zrealizowanych badań. W założeniach wstępnych wskazano na spójność geometryczną wirników, ich kanałów przepływowych, a tym

samym profili łopatek, ich ilości, rozmieszczenia, rodzaj materiału i technologii wykonania, rzutu na chropowatości powierzchni. Autorka wprowadziła opis bezwymiarowy wielkości charakteryzujących pompę, co pozwoliło jej na wskazanie wielkości kontrolnych które we wszystkich próbach powinny być utrzymane na niezmiennym poziomie (równania 6.50) oraz wyróżniki geometryczne, które będą modelowane w eksperymencie (równania 6.52-6.54). Po założeniu zakresu zmian parametrów wejściowych umożliwiło to wyznaczenie wartości rzeczywistych geometrii będących przedmiotem badań (tabela 6.4). Kluczowy z punktu widzenia dysertacji jest podrozdział 6.4, w którym autorka prezentuje wyniki własnych badań. Zrealizowano je dla dwóch wartości wskaźnika szybkobieżności, a wyniki zestawiono na rysunkach 6.6-6.8 oraz 6.9-6.11. Rozdział kończy zwięzłe podsumowanie zaobserwowanych zmian w przebiegach krzywych.

W rozdziale siódmym, autorka, zaprezentowała wyniki dwóch analiz statystycznych w celu określenia skali oddziaływania trzech podstawowych parametrów geometrycznych różnicujących wirniki i mające wpływ na wartości uzyskiwanych spiętrzeń, mocy oraz sprawności. Dzięki analizie CCD możliwe było określenie jakościowego wpływu parametrów geometrycznych na uzyskiwane charakterystyki. Ilościową analizę statystyczną wykonano poprzez odniesienie wskaźników geometrycznych do strumienia objętości płynu, którego nie uwzględnia się w analizie jakościowej ponieważ jest zmienną zależną dla poszukiwanych wartości. W podsumowaniu wskazano na wysoką zgodność dopasowania uzyskanych wyników oraz na istotny wpływ strumienia objętości na kształtowanie się błędów. W konsekwencji, autorka, stwierdza, że uzyskane rezultaty należy interpretować jedynie w zakresie analizowanych wydańności.

Rozdział ósmy przedstawia wyniki obliczeń numerycznych realizowanych w programie ANSYS CFX. We wstępie opisuje zakres stosowalności równań mechaniki płynów, skale turbulencji wirów leżące u podstaw rozwoju technik modelowania DNS, LES i RANS, hipotezę Reynoldsa prowadzącą do równań w postaci zawierającej tensory naprężeń reprezentujące transport energii poprzez korelacje fluktuacji składowych wektora prędkości i wymagający wprowadzenia modeli, które je opisują. Przedstawiony na rysunku 8.2 model numeryczny pompy wprowadzony do programu został dyskretyzowany siatkami o gęstościach od ok. 44 do ok. 54 mln. Warunki brzegowe symulacji odpowiadały warunkom pomiarowym, płyn analizowano jako nieściśliwy, co skraca czas obliczeń. W obliczeniach numerycznych użyto modelu $k-\omega$ SST z funkcjami ściany. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w postaci charakterystyk pomp z dodatkową informacją o względnych różnicach pomiędzy wynikami obliczeń i badań odniesionych do eksperymentalnych, jako informacją dodatkową. W tabeli 4.2 zestawiono uzyskane rozkłady prędkości z powiększeniami, które dostarczają dodatkowych informacji o charakterze przepływu, jego strukturze turbulencji i możliwych przyczynach zmniejszenia strat hydraulicznych. Zaprezentowano również rozkłady ciśnienia statycznego, które uzupełniają opis kinematyczny dając pełen obraz dynamiki pracy wirnika.

Merytoryczną część rozprawy kończy podsumowanie, w którym autorka streściła zakres zrealizowanych prac badawczych, odniosła się do celów pracy oraz tezy swojej dysertacji, w dwunastu punktach zawarła opis głównych wniosków wypływających ze zrealizowanej pracy i wskazała na obszary możliwych badań stanowiących kontynuację jej prac.

3. Komentarze oraz spostrzeżenia wymagające komentarza autora

Cała analizowana rozprawa doktorska przedłożona do oceny jest przygotowana w sposób bardzo dobry. Cechuje ją poprawny układ rozdziałów z podziałem na treści, ułożonych w sposób chronologiczny, adekwatny do potrzeb analizy zagadnienia badawczego. Autorka dysertacji nie ustrzegła się drobnych błędów redakcyjnych, które w mojej ocenie nie umniejszają wartości całej pracy.

W odniesieniu do wykazu symboli, indeksów i skrótów muszę zauważyć ich nieścisłość. Zgodnie z przyjętą przez Panią konwencją końce łopatek mają oznaczenie R , które przypisane w symbolach są współczynnikom korelacji i determinacji, a promieniowi przypisano r . W całym wykazie zachowany jest mianownik liczby pojedynczej z wyjątkiem e (reszty). Jeżeli MEI znalazło na str. 5 bezpośrednie rozwinięcie w Minimum Efficiency Indeks, przeto i BEP na stronie ze str. 7 powinno mieć tę samą konwencję w (BEP, Best Efficiency Point). Brak symboli z analizy wymiarowej np. $x_1..x_3$.

Na str. 8 przedstawiono wykres Sankey'a dla pompy wirowej, który jest oczywiście poprawny. W tekście znaleźć można informacje, natury ogólnej, o rozpraszaniu energii w poszczególnych elementach. Jaki jest mechanizm tego rozpraszania? Jak stan naprężeń i sił działających w płynach prowadzi do stopniowego obniżania się w pompie potencjału energii poczynając od pobieranej energii elektrycznej?

Na rysunku 2.21 przedstawiono wyniki badań z pracy [49]. Jak Pani ocenia wpływ chropowatości powierzchni na straty hydrauliczne w wirniku pompy, skoro przyjęła Pani ten sam materiał i tą samą technologię wytwarzania w badanych wirnikach?

Czy teza pracy nie jest o nazbyt ogólnym charakterze? Prace [64-73] wykazują możliwość poprawy sprawności, czyli poniekąd odpowiadają na Pani tezę. Czy brak stanu wiedzy lub ich niepewność w pewnym tylko obszarze nie byłby właściwszym doprecyzowaniem pani założenia wstępnego?

Ponieważ pomiary ciśnienia: ssania i tłoczenia realizowane są osobno, co wskazano na rys. 4.1, to z czego wynika mnożnik $\sqrt{2}$ we wzorze (4.18)?

Proszę wyjaśnić cel wprowadzenia wartości bezwzględnej w równaniu (5.1)? Traci Pani przez to informacje, ponieważ wzajemne położenia końców łopatek wpływają na strukturę strugi (tory cząstek), a tym samym straty (większe lub mniejsze wiry), patrz tabela 8.2 BW-W3 i BW-W4. Jak rozumieć „ $E_{gap} = ,,-$ ” z tabeli 5.1 dla BW-W1 i BW-W2?

Str. 94, podrozdział 6.1.2 rozpoczyna wielkość „energia właściwa” a w tabeli 6.1 pojawia się energia jednostkowa, dlaczego? W mojej ocenie „właściwa” to termin termodynamiczny, a jednostkowa wynika z opisu „mechaniki płynów”.

W tabeli 6.1 wymieniona jest lepkość kinematyczna czynnika, jest to wielkość fizyczna czy współczynnik?

Jaki jest cel wprowadzenia odrębnych symboli współczynników (6.47-6.49 i 6.50)?

Jakie przesłanki kierowały Panią przy podziale liczby doświadczeń N na licznosc prób 12:3:2?

W wynikach obliczeń numerycznych podano jedynie rozkłady wartości uśrednione po czasie, brak informacji o poziomach turbulencji, np. rozkładów kinetycznej energii turbulencji. Na podstawie tych rozkładów można wnioskować o procesach transportu energii z uporządkowanego ruchu średniego do struktur wirowych, generujących tylko i wyłącznie straty. Proszę o komentarz.

Bardzo proszę autorkę o ustosunkowanie się do moich uwag, zmieszczonych powyżej. Równocześnie pragnę oświadczyć, że dostrzeżone przeze mnie drobne błędy i nieścisłości nie rzutują negatywnie na mój pogląd o całej rozprawie. Praca jest napisana w sposób bardzo dobry. Jej chronologia jest adekwatna do zakresu prac, a przyjęte metody wnioskowania ze wszech miar poprawne. Uzyskane bardzo obszerne wyniki są zaprezentowane w sposób czytelny i nie pozostawiający wątpliwości, co do przesłanek autorki którymi kierowała się formułując wnioski w podsumowaniach. Pragnę pogratulować doktorantce wykonania prac badawczych i opracowania dysertacji na bardzo wysokim poziomie.

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. Autorka przedstawia i komentuje wyniki uzyskane podczas analiz: eksperymentalnej, statystycznej i numerycznej odnoszących się do konstrukcji pompy wirowej z łopatkami dzielonymi. Cała **rozprawa potwierdza bardzo dobrą znajomość wiedzy teoretycznej kandydatki w dyscyplinie inżynieria środowiska i energetyka**. Głównym osiągnięciem autorki jest wskazanie w konstrukcji wirników promieniowych z dzielonymi łopatkami rozwiązań najlepszych w punktu widzenia sprawności energetycznej, uzyskiwanego przyrostu ciśnienia lub uzyskiwanego strumienia objętości płynu w maszynach o niskich wyróżnikach szybkobieżności. Wnioski te potwierdzają wykonane wielowariantowe badania dla różnych wirników, przy różnych strumieniach objętości przetłaczanego czynnika roboczego.

Nowatorskie konstrukcje, w tym konstrukcja pomp z dzielonymi łopatkami stanowią ważny kierunek badań prowadzonych na świecie oraz na Politechnice Wrocławskiej. Uogólnione wnioski, uzyskiwane w ciągu lat badań mogą prowadzić do opracowania procedur projektowych i eksploatacyjnych dla nowej konstrukcji pomp promieniowych charakteryzujących się niskimi wskaźnikami szybkobieżności. Badania autorki, zwiększają różnorodności konstrukcji dostępnych do wyboru na etapie projektowania. Do osiągnięć autorki zaprezentowanych w dysertacji zaliczam:

- bardzo wnikliwy przegląd literaturowy, który jednoznacznie wskazał obszar ewentualnych badań,
- opracowanie sposobu parametryzacji łopatek wirnika pozwalającego w kolejnych etapach pracy na porównywanie rozwiązań i precyzowanie wniosków wynikających z analiz,

- zaplanowanie badań po wykonaniu stanowiska pomiarowego i przeprowadzeniu niezbędnych prób,
- wykonanie analizy statystycznej w celu wyznaczenia modeli regresyjnych,
- opracowanie algorytmu obliczeniowego w programie Ansys CFX i wykonanie wielowariantowych analiz numerycznych,
- porównanie wyników badań eksperymentalnych, statystycznych i numerycznych prowadzące do sformułowania wniosków końcowych oraz ustosunkowanie się do tezy dysertacji.

Wszystkie wymienione, przeze mnie efekty poznawcze rozprawy doktorskiej potwierdzają, w mojej opinii, że **dysertacja jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego w sferze gospodarczej**. Potwierdza to informacja zamieszczona w rozprawie o złożenia prze autorkę dysertacji, jako współautorki, wniosku patentowego w Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej potwierdzonego przyjęciem zgłoszenia w dniu 24.03.2025 r. o nr P.451555. Autorka rozprawy udowodniła, że w sposób wyważony w oparciu o dane literaturowe, wyniki obliczeń numerycznych i eksperymentalnych oraz własne interpretacje danych potrafi uzasadnić słuszność swoich założeń i formułować wnioski o charakterze użytkowym.

Uważam, że powyższe argumenty uprawniają mnie do stwierdzenia, że autorka osiągnęła założone w rozprawie cele i wykazała się ponad przeciętnym poziomem przygotowania merytorycznego, umiejętnością prowadzenia analiz oraz wnioskowaniem w oparciu o ich wyniki. Dlatego **wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka o wyróżnienie rozprawy doktorskiej** autorstwa Pani mgr inż. Anety Nycz pt. „Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na pracę pompy wirowej o niskim wskaźniku szybkoobrotowości”

5. Podsumowanie

Moim zdaniem rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Nycz stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i potwierdza wiedzę autorki obejmującą maszyny przepływowe w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie naukowej: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na pracę pompy wirowej o niskim wskaźniku szybkoobrotowości” autorstwa Pani mgr inż. Anety Nycz spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r., poz. 1668 Dz.U. oraz Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.).

Stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony, co może stanowić podstawę do nadania jej Autorce stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, po spełnieniu pozostałych warunków określonych w przywołanej Ustawie.



(Jarosław Bartoszewicz)

