

dr hab. inż. Sławomir Błasiak, prof. PŚk
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Technologii Mechanicznej
Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

Kielce, dnia 05.05.2026 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Anety Nycz

*nt. Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na pracę pompy
wirowej o niskim wyróżniku szybkobieżności*

Promotorem rozprawy jest dr hab. Janusz Skrzypacz, prof. PWr.

Promotorem pomocniczym jest dr inż. Przemysław Szulc.

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzja została opracowana w związku z § 1 ust. 11 oraz § 7 ust. 1 Regulaminu nadawania stopni naukowych na Politechnice Wrocławskiej (Uchwała nr 251/18/2024–2028 Senatu PWr z dnia 30 października 2025 r.) oraz na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Wrocławskiej z dnia 18 marca 2026 r.

Rozprawa obejmuje dziedzinę nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinę inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji dysertacja Pani mgr inż. Anety Nycz liczy 212 stron i składa się z dziesięciu głównych rozdziałów (w tym rozdziału zawierającego bibliografię), spisu treści, spisu oznaczeń, streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis literatury obejmuje 135 pozycji, wśród których znajdują się monografie, artykuły naukowe w recenzowanych czasopismach, materiały konferencyjne, normy techniczne oraz dokumenty regulacyjne. Wykaz literatury obejmuje również dwie publikacje współautorstwa Doktorantki: pracę opublikowaną w czasopiśmie *Rynek Energii* (2024) oraz artykuł w czasopiśmie *Energies* (2025). Obie publikacje są powiązane z tematyką dysertacji. Rozprawa została zrealizowana przy wsparciu zasobów obliczeniowych udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (WCSS).

Rozdział 1

Stanowi wprowadzenie do dysertacji, w którym Autorka uzasadnia znaczenie energetyczne i gospodarcze pomp wirowych jako podstawowego elementu infrastruktury przemysłowej i komunalnej. Przytoczono dane wskazujące, że transport cieczy realizowany przez instalacje pompowe odpowiada za ok. 20–30% zużycia energii elektrycznej w skali kraju, co dla warunków polskich przekłada się na ok. 29–30 mld kWh rocznie i emisję ok. 35 mln ton CO₂. Zwrócono uwagę na dominującą pozycję energii elektrycznej w kosztach cyklu życia instalacji pompowych. Omówiono również przepisy regulacyjne obowiązujące w UE, tj. dyrektywę 2009/125/WE oraz rozporządzenie nr 547/2012, definiujące wymagania minimalnego wskaźnika efektywności energetycznej (MEI) dla pomp wirowych objętych zakresem regulacji europejskich. W końcowej części rozdziału szczególną uwagę

Wydział Mechatroniki i Energetyczny

poświęcono wyzwaniom projektowym pomp o niskim wyróżniku szybkobieżności ($n_q < 15$), dla których dominującą rolę odgrywają straty tarcia tarcz wirujących i strat objętościowe. Rozdział stanowi rzetelne i dobrze udokumentowane uzasadnienie podjęcia tematu pracy.

Rozdział 2

Przegląd literatury zajmuje ok. 55 stron (ponad 25% objętości pracy) i jest podzielony na cztery logicznie powiązane bloki tematyczne.

Pierwszy z nich (podrozdział 2.1) poświęcony został stratom towarzyszącym pracy pomp wirowych: stratom objętościowym, hydraulicznym, tarcia tarcz wirujących i mechanicznym, z omówieniem bilansu mocy, uzupełnionym analizą strat w ujęciu obszarowym. W analizie tej przypisano dyssypację energii do wybranych obszarów przepływu, wskazując na dominujący udział strat w spirali i przestrzeniach okołowirnikowych. Zwrócono uwagę na wzajemne sprzężenia mechanizmów strat i ich zależność od punktu pracy.

Drugi blok tematyczny (podrozdział 2.2) prezentuje szczegółową analizę pomp o niskim wyróżniku szybkobieżności. Omówiono wyniki programów badań eksperymentalnych obejmujących układy wirnik–spirala dla różnych wartości wyróżnika szybkobieżności, prace z wirnikami o zróżnicowanej geometrii oraz analizy wskazujące na niekorzystny wpływ nadmiernego ograniczania szerokości wirnika, zwłaszcza w zakresie bardzo niskich wyróżników szybkobieżności, gdzie rośnie znaczenie strat objętościowych i strat tarcia tarcz wirujących. Szczegółowo omówiono badania z zastosowaniem laserowej anemometrii dopplerowskiej (ang. Laser Doppler Velocimetry, LDV), obrazowania przepływu cząstkami (ang. Particle Image Velocimetry, PIV) oraz śledzenia pojedynczych cząstek (ang. Particle Tracking Velocimetry, PTV). Uzupełnieniem są prace dotyczące pomp miniaturowych o bardzo niskim wyróżniku szybkobieżności oraz liczne opracowania obliczeniowej mechaniki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics, CFD) i optymalizacyjne.

W trzecim bloku (podrozdział 2.3) omówiono pasywne metody poprawy sprawności pomp wolnobieżnych, obejmujące strukturyzację tarcz wirnika przez wgłębienia, mikrorowki na ścianach kanałów międzyłopatkowych – skutkujące przyrostem sprawności hydraulicznej do ok. 3,75 punktu procentowego – rowki biomimetyczne oraz profilowanie krawędzi spływu i przycinanie łopatek. Przedstawione rozwiązania potwierdzają możliwość uzyskania wymiernych przyrostów sprawności bez zasadniczej zmiany geometrii pompy.

Czwarty blok (podrozdział 2.4) dotyczy łopatek dzielonych i szczelinowych. W podrozdziale 2.4.1 zestawiono wybrane prace dotyczące łopatek pośrednich w pompach odśrodkowych i pompoturbinach, omawiając ich wpływ na wysokość podnoszenia, sprawność, warunki ssawne, pulsacje ciśnienia i siłę promieniową. W podrozdziale 2.4.2 przeanalizowano prace poświęcone łopatom szczelinowym w pompach o niskim wyróżniku szybkobieżności, ze szczegółowym omówieniem wyników, zastosowanych metod i geometrii szczelin. **Autorka wyraźnie identyfikuje lukę badawczą, czyli brak systematycznych badań eksperymentalnych korelujących geometrię szczeliny z efektem energetycznym w szerokim zakresie wyróżnika szybkobieżności, co stanowi bezpośrednie uzasadnienie podjęcia tematyki dysertacji.**

Rozdział 3

W rozdziale 3 sformułowano główną tezę rozprawy, dwie hipotezy pomocnicze, cel pracy oraz jej zakres. Główna teza brzmi: *istnieje taka postać geometryczna łopatki*

szczelinowej, której zastosowanie w wirniku pompy krętnej o niskim wyróżniku szybkoobrotowości prowadzi do wzrostu wysokości podnoszenia i/lub sprawności. Teza została sformułowana precyzyjnie, jednoznacznie i w sposób w pełni weryfikowalny eksperymentalnie. Pierwsza hipoteza pomocnicza (H1) dotyczy istotnego wpływu geometrii szczeliny na charakterystykę wysokości podnoszenia w funkcji wydajności ($H(Q)$) oraz charakterystykę sprawności w funkcji wydajności ($\eta(Q)$), przy czym wpływ ten zależy od obszaru pracy pompy względem punktu najwyższej sprawności (BEP). Druga hipoteza pomocnicza (H2) zakłada, że wpływ ten wynika ze zmian struktury przepływu w kanale międzyłopatkowym. Cel główny pracy, którym było określenie wpływu postaci geometrycznej łopatki szczelinowej na charakterystyki pompy oraz sformułowanie zaleceń projektowych, jest bezpośrednio powiązany z tezą rozprawy. Zakres pracy jest kompletny i logicznie spójny: obejmuje przegląd literatury, analizę wymiarową, badania wstępne i zasadnicze, analizę statystyczną z wykorzystaniem metody powierzchni odpowiedzi (RSM) oraz centralnego planu kompozycyjnego (CCD), obliczenia z zakresu numerycznej mechaniki płynów (CFD), a także sformułowanie wytycznych projektowych.

Rozdział 4

Poświęcony jest metodyce badań eksperymentalnych. Opisano stanowisko badawcze z wymiennym wirnikiem pracującym w kanale koncentrycznym ($d_{\text{konc}} = 175 \text{ mm}$, $b_{\text{konc}} = 22 \text{ mm}$), wyposażone w aparaturę pomiarową obejmującą przepływomierz elektromagnetyczny, manometry, przetwornik mocy, przetwornik temperatury oraz układ regulacji prędkości obrotowej. Podano także podstawowe klasy dokładności urządzeń pomiarowych, co umożliwia ocenę jakości metrologicznej badań. Badania prowadzono w pełnym zakresie otwarcia zaworu regulacyjnego po stronie tłocznej zgodnie z normą PN-EN ISO 9906:2012 (klasa dokładności 1). Pomiar realizowano na zautomatyzowanym stanowisku z dedykowanym oprogramowaniem, rejestrującym ciśnienia p_s i p_t , wydajność Q , moc elektryczną P_{el} , prędkość obrotową n i temperaturę t .

Podano wzory obliczeniowe wysokości podnoszenia według ISO 9906:2012 z uwzględnieniem składowych prędkości w króćcach ssawnym i tłocznym. Wyniki przeliczano do prędkości odniesienia $n = 2870 \text{ obr/min}$ zgodnie z prawami podobieństwa hydrodynamicznego. Przeprowadzono szczegółową analizę niepewności pomiarowych, obejmującą wydajność, wysokość podnoszenia, moc hydrauliczną, moc na wale oraz sprawność. Maksymalna niepewność względna sprawności nie przekraczała 0,45%, co potwierdza wysoką jakość metrologiczną badań.

Rozdział 5

Zawiera wyniki badań wstępnych przeprowadzonych dla wirnika bazowego o wyróżniku szybkoobrotowości $n_q = 12,68$, zaprojektowanego z parametrami: $d_2 = 150 \text{ mm}$, $d_1 = 36 \text{ mm}$, $\beta_1 = 45^\circ$, $\beta_2 = 30^\circ$, $z = 7$, $b_1 = b_2 = 2 \text{ mm}$. W ramach badań wstępnych przebadano siedem wariantów geometrycznych łopatki szczelinowej w porównaniu z wirnikiem referencyjnym BW-W0. Warianty obejmowały różne sposoby przecięcia łopatki, przesunięcia wtórnej części łopatki w kierunku strony czynnej lub biernej oraz wariant z podwójnym przecięciem. Wirniki wykonano metodą FDM z materiału PLA. Wyniki badań wykazały, że wszystkie warianty szczelinowe poprawiły sprawność względem BW-W0, szczególnie dla $Q > 6 \text{ m}^3/\text{h}$. Najkorzystniejsze rezultaty uzyskano dla wariantu z przesunięciem wtórnej części łopatki w kierunku strony czynnej (BW-W5), dla którego maksymalny przyrost sprawności w BEP wyniósł 3,86 p.p. Charakterystyki mocy na wale $P_w(Q)$ były praktycznie niezmiennione, co sugeruje, że obserwowana poprawa

sprawności wynikała przede wszystkim z redukcji strat hydraulicznych. Na podstawie tych wyników wariant BW-W5 wybrano do badań zasadniczych i wyznaczono zakresy zmienności parametrów R_{lgap} , L_{gap} , E_{gap} .

W ramach badań wstępnych podjęto również próbę wyznaczenia zakresu stosowalności łopatek szczelinowych. Porównano trzy wirniki referencyjne ($b = 1, 2$ i 10 mm), uzyskując wyróżniki szybkobieżności odpowiednio $n_q = 9,90$; $12,46$ i $15,63$. Dla każdej szerokości porównano wirnik referencyjny z trzema wariantami szczelinowymi (ZS-W1 do ZS-W3). Dla $b = 1$ mm stwierdzono korzystny wpływ szczelin – wariant ZS-W3 osiągnął najwyższe wartości H i η . Dla $b = 2$ mm ($n_q = 12,46$) efekt ten był nadal obserwowany, jednak o mniejszej intensywności. W przypadku $b = 10$ mm i $n_q = 15,63$ nie odnotowano korzyści – krzywe $H(Q)$ przebiegały poniżej referencji, a różnice sprawności nie przekraczały niepewności pomiarowej. Na tej podstawie przyjęto granicę stosowalności łopatek szczelinowych dla $n_q \approx 13$ – 15 i skierowano badania zasadnicze na zestawy o $b = 2$ mm (Z1) i $b = 1$ mm (Z2).

Rozdział 6

Stanowi rdzeń eksperymentalny dysertacji. W podrozdziale 6.1 przeprowadzono analizę wymiarową metodą Buckinghama dla 10 zmiennych fizycznych (Y , Q , P_w , ρ , v , n , d_2 , R_{lgap} , L_{gap} , E_{gap}) z układem trzech wymiarów podstawowych [m , kg , s]. Jako zmienne powtarzające wybrano ρ , n , d_2 . Wyznaczono siedem iloczynów bezwymiarowych, z których trzy miały charakter geometryczny: $\xi_{Rlgap} = R_{lgap}/d_2$, $\xi_{Lgap} = L_{gap}/d_2$, $\xi_{Egap} = E_{gap}/d_2$. Przy założeniu stałych warunków pracy zredukowano zagadnienie do funkcji trzech bezwymiarowych parametrów geometrycznych szczeliny, co stanowi matematyczne uzasadnienie wyboru zmiennych do Centralnego Planu Kompozycyjnego (CCD).

W podrozdziale 6.2 opisano plan eksperymentu. Zastosowano Centralny Plan Kompozycyjny (CCD) według metodologii Powierzchni Odpowiedzi (RSM) dla $k = 3$ czynników: $x_1 = E_{gap}$, $x_2 = R_{lgap}$, $x_3 = L_{gap}$. Plan zaprojektowano jako rotoabilny ($\alpha = 1,682$ dla $k = 3$), obejmujący 8 punktów narożnych (± 1), 6 punktów gwiazdnych ($\pm \alpha$) oraz $n_c = 3$ powtórzenia punktu centralnego, co daje łącznie $N = 17$ wariantów eksperymentalnych. Zakresy parametrów wyznaczono na podstawie wyników badań wstępnych: $R_{lgap} = 38$ – 62 mm, $L_{gap} = 2$ – 8 mm, $E_{gap} = 6$ – 10 mm. Plan zrealizowano dla dwóch zestawów wirników: Z1 ($b = 2$ mm, $n_q = 12,46$) i Z2 ($b = 1$ mm, $n_q = 9,90$).

W podrozdziale 6.3 opisano przygotowanie modeli wejściowych dla badań zasadniczych. Geometrię 18 wirników (1 referencyjny + 17 szczelinowych) opracowano w CATIA V5 jako modele parametryczne sterowane zmiennymi planu CCD dla zestawów Z1 i Z2. Każdy wariant przygotowano w dwóch wersjach: modelu roboczego przeznaczonego do druku 3D oraz domeny płynu wykorzystywanej w obliczeniach CFD. Wirniki wykonano w technologii FDM z PLA na drukarce Bambu Lab X1 Carbon, uzyskując wyraźnie lepszą jakość powierzchni niż w przypadku drukarki Prusa MK3, wykorzystanej w badaniach wstępnych. Chropowatość powierzchni zmierzono przy użyciu mikroskopu cyfrowego KEYENCE VHX-X1F zgodnie z PN-EN ISO 21920-2:2022-06.

W podrozdziale 6.4 przedstawiono wyniki badań dla zestawu Z1 ($n_q = 12,46$) i Z2 ($n_q = 9,90$). Dla Z1 poprawę wysokości podnoszenia odnotowano w 15 z 17 wariantów szczelinowych, a maksymalny przyrost sprawności wyniósł $\Delta\eta = 2,78$ p.p., przy jednoczesnym wzroście maksymalnej wydajności z ok. $11,39$ do $12,47$ m³/h. Dla Z2 poprawę $H(Q)$ uzyskano w 16 z 17 wariantów, a maksymalny przyrost sprawności wyniósł $\Delta\eta = 4,91$ p.p. dla wirnika W12 ($R_{lgap} = 70$ mm), przy wzroście maksymalnej wydajności

z ok. 6,34 do 7,41 m³/h. W obu zestawach zaobserwowano przesunięcie obszaru punktu maksymalnej sprawności (BEP) w stronę większych wydajności, spłaszczenie charakterystyki $\eta(Q)$ i praktycznie niezmienną moc na wale. Szczególnie niekorzystne okazały się warianty z $R_{\text{Igap}} = 30$ mm (W11), które w obu zestawach wykazały obniżenie wysokości podnoszenia (H) i sprawności (η).

Rozdział 7

Stanowi analizę statystyczną wyników badań zasadniczych. W podrozdziale 7.1 oceniono powtarzalność pomiarów oraz wyznaczono czysty błąd eksperymentu na podstawie replikacji punktu centralnego planu CCD. Uzyskane wartości świadczą o dobrej jakości danych pomiarowych i potwierdzają poprawność przyjętej procedury eksperymentalnej.

W podrozdziale 7.2 przeprowadzono jakościową analizę wpływu parametrów geometrycznych szczeliny (E_{gap} , R_{Igap} , L_{gap}) na charakterystyki pracy pompy. Wykazano istotny wpływ szerokości szczeliny oraz promienia jej położenia, przy mniej jednoznacznym wpływie długości szczeliny, zależnym od analizowanego zakresu pracy i zestawu wirników.

W podrozdziale 7.3 przedstawiono ilościową analizę statystyczną. Opracowano modele regresyjne II stopnia w ramach metody powierzchni odpowiedzi (RSM), rozszerzone o zmienną operacyjną Q , co umożliwiło opis pełnych charakterystyk $H(Q)$ i $\eta(Q)$. Modele wysokości podnoszenia osiągnęły wartości $R^2 = 0,942$ dla Z1 oraz $R^2 = 0,977$ dla Z2, natomiast modele sprawności odpowiednio $R^2 = 0,953$ dla Z1 i $R^2 = 0,889$ dla Z2. Istotność modeli regresyjnych potwierdzono analizą ANOVA, natomiast istotność poszczególnych współczynników oceniono testem t-Studenta.

W analizie reszt stwierdzono występowanie dodatniej autokorelacji (niska wartość statystyki Durbin–Watsona), co Autorka wiąże z sekwencyjnym wyznaczaniem punktów pracy. Wyniki przedstawiono również w postaci map konturowych odnoszących się do maksymalnej sprawności η_{BEP} .

Rozdział 8

Poświęcony jest obliczeniom numerycznym CFD jako uzupełnieniu analizy eksperymentalnej. W podrozdziale 8.1 omówiono podstawy modelowania turbulencji, obejmujące dekompozycję Reynoldsa, równania RANS oraz porównanie metod DNS, LES i RANS wraz z oceną ich przydatności w warunkach przepływu w pompie.

Obliczenia przeprowadzono w środowisku ANSYS CFX 2024 R2 z zastosowaniem metody objętości skończonych, modelu turbulencji $k-\omega$ SST i podejścia MRF dla domeny wirnika. W podrozdziale 8.2 szczegółowo opisano model numeryczny. Obszar przepływu podzielono na trzy domeny: element doprowadzający, wirnik i kanał koncentryczny. Siatki wygenerowano jako niestukturalne z warstwami przyściennymi, przy docelowej wartości $y^+ \approx 1$. Przeprowadzono test niezależności od siatki (GIT), a w modelu uwzględniono chropowatość wirnika i kanału koncentrycznego. Warunki brzegowe odpowiadały warunkom eksperymentalnym: na wlocie zadano stałe ciśnienie statyczne, na wylocie strumień masy, a połączenia domen zdefiniowano jako interfejsy typu „frozen rotor”. Sprawność CFD korygowano przez przyjęte wartości sprawności objętościowej i mechanicznej.

Walidację ilościową przeprowadzono dla wirnika Z1-W1, porównując charakterystyki $H(Q)$ i $\eta(Q)$ z pomiarami eksperymentalnymi. W punkcie BEP uzyskano bardzo dobrą zgodność wyników, natomiast większe rozbieżności odnotowano na krańcach zakresu wydajności, co wiązano z ograniczeniami modelu stacjonarnego RANS. Na tej podstawie model uznano za zwalidowany.

W podrozdziale 8.3 przedstawiono analizę jakościową pól przepływu. Dla badań wstępnych zestawiono rozkłady prędkości na płaszczyźnie SPAN50 i pola ciśnienia w rozwinięciu kanału blade-to-blade dla wszystkich 8 wariantów (BW-W0 do BW-W7). Wykazano, że warianty z przesunięciem łopatki na stronę czynną (BW-W5) charakteryzowały się najrówniejszym rozkładem prędkości i bardziej monotonnym przyrostem ciśnienia. Warianty z przesunięciem na stronę bierną (BW-W4, BW-W6) wykazywały silniejsze lokalne niejednorodności.

W badaniach zasadniczych analizę przeprowadzono dla wirnika referencyjnego W0, wariantów najkorzystniejszych (W1 dla Z1 i W12 dla Z2) oraz wariantu o najmniej korzystnych parametrach energetycznych (W11). Korzystne warianty wykazywały bardziej wyrównany rozkład prędkości, mniejsze strefy martwych przestrzeni i stabilniejszy przyrost ciśnienia wzdłuż kanału. Wariant W11 ($R_{\text{lgap}} = 30 \text{ mm}$) charakteryzował się rozległymi obszarami małych prędkości i silnymi lokalnymi zaburzeniami ciśnienia, co stanowiło fizyczną interpretację jego gorszych parametrów energetycznych. Wyniki CFD potwierdziły hipotezę H2.

Rozdział 9

Stanowi podsumowanie dysertacji. Autorka sformułowała 12 ponumerowanych wniosków oraz wskazała 6 kierunków dalszych badań. Wnioski są konkretne, liczbowo udokumentowane i wynikają bezpośrednio z przeprowadzonych badań. Obejmują one potwierdzenie tezy rozprawy, określenie granicy stosowalności łopatek szczelinowych na poziomie $n_q \approx 13\text{--}15$, zestawienie uzyskanych przyrostów sprawności i wydajności oraz wskazanie parametrów geometrycznych szczeliny mających największy wpływ na efektywność rozwiązania. Jako dodatkowe potwierdzenie wartości aplikacyjnej wyników należy odnotować zgłoszenie rozwiązania do ochrony patentowej (P.451555, 24.03.2025 r.). Kierunki dalszych badań, obejmujące m.in. wirniki wieloszczelinowe, wpływ szczelin na kawitację, obliczenia niestacjonarne oraz poszerzenie zakresu analiz geometrycznych, zostały sformułowane trafnie i stanowią naturalne rozwinięcie dysertacji.

Rozdział 10 (Literatura)

Spis literatury obejmuje 135 pozycji bibliograficznych, w tym monografie, artykuły w recenzowanych czasopismach (m.in. *Energies*, *Journal of Fluids Engineering*, *Physics of Fluids*, *Processes*), materiały konferencyjne, normy (PN-EN ISO 9906:2012, PN-EN ISO 21920-2:2022-06), podręczniki z zakresu analizy wymiarowej i statystycznej oraz dokumentację oprogramowania ANSYS CFX. W zestawieniu uwzględniono również dwie publikacje współautorstwa Doktorantki: artykuł w czasopiśmie *Rynek Energii* (2024) oraz *Energies* (2025). Dobór literatury należy uznać za staranny i aktualny, a jej zakres obejmuje wszystkie istotne aspekty tematyki pracy.

3. Merytoryczna ocena pracy

Pompy wirowe odśrodkowe stanowią podstawowy element infrastruktury technicznej współczesnego przemysłu. Ze względu na skalę ich stosowania, sięgającą blisko 80% rynku urządzeń pompowych, poprawa sprawności nawet o ułamek punktu procentowego może mieć realne znaczenie energetyczne i ekonomiczne. Szczególnym wyzwaniem są pompy o niskim wyróżniku szybkoobrotowości ($n_q < 15$), w których uzyskanie wysokiej sprawności ograniczają dominujące straty tarcia tarcz wirujących, straty objętościowe, skłonność do separacji przepływu oraz trudność utrzymania stabilnej charakterystyki $H(Q)$. W kontekście wymogów ekoprojektu UE i konieczności spełnienia

minimalnych wskaźników efektywności energetycznej poszukiwanie skutecznych metod poprawy sprawności tych maszyn ma zarówno istotne znaczenie naukowe, jak i bezpośrednie przełożenie na praktykę projektową.

Tematyka dysertacji Pani mgr inż. Anety Nycz jest aktualna i wpisuje się w ważny nurt badań nad efektywnością energetyczną pomp odśrodkowych. Zastosowanie łopatki szczelinowej jako pasywnej modyfikacji wirnika jest koncepcją opisywaną w literaturze przede wszystkim dla pomp o średnich i wyższych wyróżnikach szybkobieżności, natomiast jej systematyczne badanie eksperymentalne w zakresie $n_q < 15$ stanowi rzeczywistą lukę badawczą, trafnie zidentyfikowaną i udokumentowaną przez Autorkę. Praca ma charakter eksperymentalny, uzupełniony analizą statystyczną i obliczeniami CFD, co tworzy kompletną metodykę badań w obszarze maszyn przepływowych.

Dwuetapowy program badań, obejmujący badania wstępne siedmiu wariantów geometrycznych łopatki szczelinowej i wirnika referencyjnego, a następnie badania zasadnicze przeprowadzone dla 17 wariantów w dwóch zestawach, należy ocenić jako metodycznie bardzo dobrze uzasadniony. Zastosowanie analizy wymiarowej, planu rotoabilnego CCD z replikacją punktu centralnego, wyznaczenie czystego błędu eksperymentu, zgodność z normą PN-EN ISO 9906:2012 oraz staranna analiza niepewności pomiarowych świadczą o dojrzałości metodycznej i naukowej Autorki.

Modele regresyjne RSM, w których wydajność Q uwzględniono jako dodatkową zmienną objaśniającą, stanowią wartościowe rozszerzenie standardowego planu CCD i umożliwiają opis pełnych charakterystyk $H(Q)$ oraz $\eta(Q)$. Modele wysokości podnoszenia osiągnęły wartości $R^2 = 0,942$ dla zestawu Z1 oraz $R^2 = 0,977$ dla zestawu Z2, natomiast modele sprawności odpowiednio $R^2 = 0,953$ dla Z1 i $R^2 = 0,889$ dla Z2. Wyniki ANOVA ($p < 0,001$) potwierdzają istotność modeli i ich przydatność jako narzędzi wspomagających projektowanie. Uzupełnienie badań eksperymentalnych obliczeniami CFD w ANSYS CFX 2024 R2, z zastosowaniem modelu $k-\omega$ SST, walidacji ilościowej i testu niezależności siatki, dostarcza fizycznie spójnej interpretacji mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane zmiany charakterystyk energetycznych.

Wyniki badań mają istotny potencjał aplikacyjny. Wykazano liczbowo udokumentowane przyrosty sprawności: maks. 2,78 p.p. dla $n_q = 12,46$ i maks. 4,91 p.p. dla $n_q = 9,90$, wraz z rozszerzeniem zakresu pracy i przesunięciem BEP. Wyznaczona granica stosowalności ($n_q \approx 13-15$) zwiększa praktyczną wartość uzyskanych wyników. Zgłoszenie patentowe P.451555 oraz publikacja w czasopiśmie *Energies* (2025) dodatkowo potwierdzają ich wartość aplikacyjną. Doktorantka wykazała się umiejętnością formułowania i weryfikacji hipotez naukowych, samodzielnego prowadzenia badań eksperymentalnych i numerycznych oraz interpretacji wyników w szerszym kontekście literaturowym.

Oryginalny wkład naukowy rozprawy polega na eksperymentalnym i statystycznym wykazaniu wpływu geometrii łopatki szczelinowej na charakterystyki pracy pompy odśrodkowej o niskim wyróżniku szybkobieżności, wskazaniu korzystnych zakresów parametrów szczeliny oraz określeniu granicy stosowalności tego rozwiązania w badanym zakresie n_q .

Całość rozprawy oceniam pozytywnie.

4. Uwagi szczegółowe

Do najważniejszych uwag szczegółowych zaliczam następujące:

A. Uwagi szczegółowe o charakterze merytorycznym, metodycznym i redakcyjnym:

1. Str. 67 (rozdz. 4.2) – Równanie (4.9) definiuje moc na wale jako $P_w = P_{el} \cdot \eta_s$, jednak wartość sprawności silnika elektrycznego η_s nie jest nigdzie w pracy podana ani zdefiniowana. Należy uzupełnić wartość η_s lub odesłać do danych fabrycznych napędu, ze wskazaniem, czy i w jaki sposób uwzględniono jej zmienność z obciążeniem silnika.
2. Str. 9 (rys. 2.2) – Na rysunku przedstawiającym udział składowych strat mocy w funkcji wyróżnika szybkobieżności oś pozioma opisana jest jako n_{sQ} , podczas gdy w tekście pracy i w opisie pod rys. 2.2 konsekwentnie stosowany jest kinematyczny wyróżnik szybkobieżności n_q . Nomenklatura powinna być ujednolicona lub należy jasno wyjaśnić relację między tymi oznaczeniami i podać wzór konwersji.
3. Str. 71 oraz tab. 5.4 – W opisie badań wstępnych podano, że wirnik bazowy zaprojektowano dla $n_q = 12,68$, natomiast w tabeli 5.4 dla wirnika referencyjnego o $b = 2$ mm podano $n_q = 12,46$, wyznaczone na podstawie punktu BEP. Różnica ta może wynikać z przejścia od wartości projektowej do wartości określonej na podstawie rzeczywistych charakterystyk pomiarowych, jednak warto byłoby jednoznacznie doprecyzować relację między tymi wartościami, zwłaszcza że $n_q = 12,46$ jest następnie stosowane jako oznaczenie zestawu Z1 w badaniach zasadniczych.
4. Str. 103 (tab. 6.4) – Wirnik W13 w planie CCD ma parametr $L_{gap} = 0$ mm ($R_{1gap} = R_{2gap} = 50$ mm, przy $E_{gap} = 8$ mm), co oznacza geometrycznie graniczny przypadek szczeliny o zerowej długości. Autorka traktuje ten wariant jako punkt planu szczelinowego i wykorzystuje go w analizie wpływu L_{gap} , jednak warto byłoby jednoznacznie wyjaśnić, czym taka geometria różni się od wirnika referencyjnego W0 oraz jak należy interpretować parametr E_{gap} przy $L_{gap} = 0$ mm. Kwestia ta ma znaczenie dla interpretacji wyników oraz dla rozróżnienia, czy W13 jest rzeczywistym wariantem szczelinowym, czy granicznym punktem odniesienia w planie CCD.
5. Str. 126–127 (tab. 7.1) – Współczynnik zmienności CV dla jednego punktu pracy wirnika W11 wynosi 1,79%, co jest wyraźnie wyższe niż dla pozostałych punktów (0,07–1,11%) tego samego wirnika i pozostałych wirników w zestawieniu. Autorka nie komentuje tej obserwacji, choć może ona wskazywać na lokalną niestabilność przepływu lub inne zjawisko hydromechaniczne.
6. Str. 155 (podrozdz. 7.3.4) – Mapy konturowe RSM (rys. 7.16–7.20) odnoszą się do zmiennej odpowiedzi zdefiniowanej jako η_{BEP} (maksymalna sprawność w punkcie BEP danego wirnika), podczas gdy globalne modele regresyjne opisują $\eta(Q)$ dla dowolnej wydajności Q . Warto wyraźniej rozdzielić dwa poziomy modelowania: globalne modele regresyjne $H(Q)$ i $\eta(Q)$, obejmujące wydajność Q jako zmienną operacyjną, oraz mapy konturowe RSM dla η_{BEP} . Oba podejścia są użyteczne, ale powinny być jednoznacznie opisane jako odrębne narzędzia analityczne.
7. Str. 167–168 (tab. 8.1) – W tabeli parametrów siatek obliczeniowych podano dane tylko dla dwóch siatek (Z1_W0 i Z1_W1). Brakuje analogicznych danych dla

zestawu Z2 oraz dla wirnika W11 i W12, dla których również przedstawiono wyniki CFD. Zestawienie można uzupełnić o wszystkie obliczone warianty lub dodać odpowiedni komentarz.

8. Str. 147 (podrozdz. 7.3.3) – Autorka stwierdza, że wyraz wolny w modelu sprawności dla zestawu Z2 nie jest istotny statystycznie ($p = 0,747$), jednak nie podejmuje dalszej interpretacji tego faktu. Należy zauważyć, że pozostawienie wyrazu wolnego w modelu regresyjnym, nawet w przypadku jego nieistotności statystycznej, jest formalnie uzasadnione i zgodne z przyjętą metodyką RSM/DOE. Warto uzupełnić analizę o krótką interpretację tego wyniku oraz jednoznacznie wskazać, że struktura modelu została zachowana zgodnie z przyjętym schematem eksperymentalnym.

B. Kwestie o charakterze dyskusyjnym:

9. Granica stosowalności łopatek szczelinowych przyjęta na poziomie $n_q \approx 13\text{--}15$ wyznaczona jest jedynie na podstawie trzech szerokości wirnika ($b = 1, 2, 10$ mm), odpowiadających $n_q = 9,90; 12,46$ i $15,63$. Przeskok $b = 2$ mm $\rightarrow b = 10$ mm jest bardzo duży i nie pokrywa zakresu $n_q \approx 12,5\text{--}15,6$ żadnymi punktami pośrednimi. Pytanie do Autorki: jakie przesłanki technologiczne lub stanowiskowe uniemożliwiły zbadanie wirników o szerokości $b \approx 4\text{--}7$ mm? Czy przebieg granicy stosowalności nie mógłby być bardziej ciągły i precyzyjny?
10. Wszystkie badania przeprowadzono dla wirnika pracującego w kanale koncentrycznym o przekroju prostokątnym, a nie w spirali typowej dla pomp przemysłowych. Autorka słusznie stosuje identyczny element odprowadzający dla wszystkich wariantów, co zapewnia porównywalność. Jednak literatura wskazuje, że w zakresie niskiego n_q położenie BEP jest w dużej mierze determinowane przez geometrię spirali, która kształtuje dopasowanie charakterystyk wirnika i elementu odprowadzenia. Pytanie do Autorki: w jakim stopniu wyniki i zalecenia projektowe sformułowane dla układu z kanałem koncentrycznym można przenieść na pompy wyposażone w spiralę klasyczną?
11. Sprawności w zestawie Z2 ($n_q = 9,90$) są bardzo niskie: wirnik referencyjny osiąga $\eta \approx 22,41\%$ w BEP, a maksimum dla najlepszego wariantu szczelinowego sięga ok. 27% . Przy tak niskich wartościach wzrost o $4,91$ p.p. jest relatywnie duży, jednak wartości bezwzględne sprawności wskazują na istotny udział strat całkowitych w badanym układzie. Warto byłoby doprecyzować, w jakim stopniu w bilansie sprawności rozdzielono straty hydrauliczne, objętościowe i mechaniczne oraz czy przyjęte w części numerycznej wartości sprawności objętościowej i mechanicznej ($\eta_v = 0,85$, $\eta_m = 0,92$) wynikają z pomiarów stanowiskowych, danych katalogowych, literatury czy założeń modelowych. Pytanie do Autorki: czy przeprowadzono dodatkową analizę umożliwiającą lepszą identyfikację udziału poszczególnych grup strat w całkowitym bilansie energetycznym pompy, zwłaszcza dla zestawu Z2?

Uwagi redakcyjne i językowe.

W pracy występują drobne usterki gramatyczne i stylistyczne, które nie wpływają na ocenę merytoryczną rozprawy. Nie będą one tutaj szczegółowo przytaczane, zwłaszcza że praca została wydana drukiem. Dotyczą one m.in. zgodności rodzaju i przypadku w spisie

oznaczeń, pojedynczych błędów składniowych w przeglądzie literatury, zbędnych przecinków oraz niekonsekwentnego użycia czasów gramatycznych przy relacjonowaniu cudzych badań.

Pomimo wskazanych usterek należy podkreślić, że dysertacja cechuje się staranną redakcją, konsekwentną terminologią i przejrzystym układem treści. Przeprowadzone badania wymagały znacznego nakładu pracy, zarówno w zakresie wytworzenia i pomiaru dużej liczby wirników, jak i kompleksowego opracowania statystycznego i numerycznego obszernego zbioru danych.

Podsumowując, całość rozprawy oceniam pozytywnie.

5. Ocena końcowa pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anety Nycz dotyczy aktualnego zagadnienia badawczego związanego z oceną wpływu parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na charakterystyki pracy pompy odśrodkowej o niskim wyróżniku szybkobieżności i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Analiza wyników badań eksperymentalnych, statystycznych i numerycznych została przeprowadzona prawidłowo. Sformułowana teza została potwierdzona, a cel pracy osiągnięty. Rozprawa świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym Autorki.

Doktorantka wykazała się odpowiednią wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych, projektowania i realizacji eksperymentów, stosowania zaawansowanych metod analizy statystycznej i numerycznej oraz interpretacji wyników w kontekście aktualnego stanu wiedzy. Świadczą o tym zarówno wyniki badań eksperymentalnych, jak i publikacje naukowe, związane z tematyką dysertacji.

Zakres przeprowadzonych badań, obejmujący rozbudowany program eksperymentalny, analizę statystyczną, walidowane obliczenia CFD oraz zgłoszenie patentowe, wykracza ponad przeciętny zakres rozpraw doktorskich w tym obszarze. **Uzyskane wyniki mają zarówno wartość poznawczą, jak i potencjał aplikacyjny, co stanowi podstawę do sformułowania wniosku o wyróżnienie rozprawy.**

Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Anety Nycz pt. *„Wpływ parametrów konstrukcyjnych wirnika z łopatką szczelinową na pracę pompy wirowej o niskim wyróżniku szybkobieżności”* spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r., poz. 1571) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Kielce 05.05.2026 r.

