

Prof. dr hab. inż. Barbara Tora

Kraków, 8 marca 2026 r.

Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Badania eksperymentalne i numeryczne pierścienia dyszowego
w młynach średniobieżnych.**

Autor mgr inż. Łukasz Zalewski

Promotor dr hab. inż. Bartłomiej Hernik, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy: dr inż. Mateusz Tymoszek

Dyscyplina: Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka

Jednostka: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki oraz FPM S.A.

Rok powstania: 2025

1. Wprowadzenie

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Zalewskiego podejmuje niezwykle istotne i aktualne zagadnienie optymalizacji elementów konstrukcyjnych młynów średniobieżnych, stosowanych powszechnie w energetyce zawodowej oraz przemyśle surowców mineralnych. Praca została zrealizowana w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”, co odcisnęło wyraźne piętno na jej charakterze – łączy ona podejście naukowe z bezpośrednią użytecznością przemysłową dla firmy FPM S.A.

Głównym motywem podjęcia tematyki badawczej jest zmieniający się krajobraz polskiej i światowej energetyki. Wzrastający udział odnawialnych źródeł energii (OZE) w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym wymusza na blokach konwencjonalnych pracę o dużej dynamice, często przy obniżonych obciążeniach. Takie warunki eksploatacji są wyzwaniem dla układów przygotowania pyłu węglowego, gdzie kluczowym elementem kształującym aerodynamikę procesu jest pierścień dyszowy.

Zadaniem pierścienia dyszowego (dysz wylotowych z konstrukcją nośną) jest kierowanie strumienia gorącego powietrza w obręb zespołu mielącego, gdzie zmielony węgiel schodzący (w wyniku oddziaływania siły odśrodkowej) z bieżni pierścienia miażdżącego, zostaje poddany suszeniu przez strumień gorącego powietrza. Ziarna węgla uniesione przez gorące

powietrze ulegają procesom separacji i segregacji w wyniku zmian prędkości strumienia powietrza w młynie nad zespołem mielącym a później w odsiewaczu.

2. Cel, zakres i tezy rozprawy

Autor postawił przed sobą ambitny cel: opracowanie nowej geometrii pierścienia dyszowego, która umożliwi minimalizację strat ciśnienia przy jednoczesnym zapewnieniu równomiernego profilu prędkości mieszanki pyłowo-powietrznej. Cel ten jest ściśle powiązany z potrzebą zwiększenia elastyczności pracy bloków energetycznych.

Główna teza pracy zakłada, że istnieje techniczna możliwość modyfikacji konstrukcji pierścienia dyszowego w taki sposób, aby zmniejszyć opory przepływu czynnika i uzyskać optymalną zdolność wynoszenia cząstek pyłu w szerokim zakresie wentylacji młyna.

Zakres pracy obejmuje pełną ścieżkę badawczą:

- Badania obiektowe na rzeczywistym młynie przemysłowym,
- Badania laboratoryjne na specjalnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku w skali modelowej,
- Badania numeryczne z wykorzystaniem narzędzia Computational Fluid Dynamics (CFD), służące walidacji i optymalizacji geometrii.

3 Analiza merytoryczna zawartości pracy

Rozprawa posiada logiczną i przejrzystą strukturę, odpowiadającą standardom prac inżyniersko-badawczych. Tekst pracy zawarty jest na 195 stronach,

3.1. Przegląd literatury

Rozdział pierwszy stanowi solidne wprowadzenie w tematykę młynów średniobieżnych (misowo-rolkowych i pierścieniowo-kulowych). Spis wykorzystanej literatury zawiera 72 pozycje. Szkoda, że w nowszych pozycjach literatury Doktorant nie zastosował numeru DOI, co jest aktualnie standardem ułatwiającym znalezienie pozycji w Internecie.

Doktorant dokonał wnikliwej analizy stanu wiedzy, wskazując na deficyt publikacji naukowych dotyczących ściśle optymalizacji pierścienia dyszowego. Recenzentka docenia fakt, że Doktorant przywołał zarówno klasyczne pozycje dotyczące procesu mielenia, jak i nowoczesne trendy w sterowaniu młynami (np. kontrolery MPC, algorytmy ewolucyjne czy modele sztucznej inteligencji).

3.2. Metodologia badań obiektowych

Badania obiektowe zostały przeprowadzone na pracującym młynie przemysłowym, co zasługuje na szczególne podkreślenie ze względu na trudności logistyczne i techniczne. Autor wykazał się dużą starannością w przygotowaniu punktów pomiarowych, uwzględniając ryzyko uszkodzenia aparatury przez pył węglowy. Pomiary rozkładu ciśnień i prędkości rurką Pitota dostarczyły bezcennych danych wejściowych do dalszych etapów pracy.

3.3. Stanowisko laboratoryjne i badania modelowe

Ważnym osiągnięciem autora jest zaprojektowanie i budowa stanowiska laboratoryjnego do badań pierścieni dyszowych. Stanowisko to pozwoliło na fizyczną weryfikację założeń projektowych w kontrolowanych warunkach. Autor słusznie zastosował kryteria podobieństwa przepływów, co umożliwiło odniesienie wyników laboratoryjnych do skali przemysłowej.

3.4. Modelowanie numeryczne CFD

W części numerycznej autor wykorzystał oprogramowanie Ansys Fluent. Zastosowanie modelu turbulencji k-epsilon (realizable) oraz podejścia Eulera-Lagrange'a do opisu przepływu dwufazowego jest w pełni uzasadnione i zgodne z najlepszą praktyką w tym obszarze. Walidacja modelu numerycznego na podstawie danych obiektowych i laboratoryjnych wykazała wysoką zgodność, co pozwoliło na bezpieczne prowadzenie symulacji dla wariantów zmodyfikowanych.

4. Wyniki badań i ich dyskusja

4.1. Geometria bazowa

Badania geometrii bazowej wykazały, że pierścień dyszowy odpowiada za znaczącą część (od 70% do 79%) całkowitych strat ciśnienia w młynie. To potwierdza, że jest to element krytyczny dla efektywności energetycznej całego układu. Doktorant zaobserwował również, że ruch obrotowy pierścienia dyszowego sprzyja wyrównaniu profilu prędkości na obwodzie komory młyna.

4.2. Warianty zmodyfikowane

Najciekawszą częścią pracy jest analiza jedenastu wariantów alternatywnych geometrii. Autor zbadał m.in. wpływ kąta ustawienia łopatek, ich kształtu (płaskie vs zakrzywione) oraz nowatorską koncepcję dysz otworowych o zaokrąglonym kształcie (Model 2.5).

Wyniki są obiecujące:

- Zastosowanie płaskich łopatek zamiast standardowych rozwiązań pozwoliło na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn, co potwierdza postawioną tezę.
- Model 2.5 (dysze otworowe) charakteryzował się najniższymi oporami przepływu przy jednoczesnym uzyskaniu najwyższych prędkości transportujących, co czyni go wariantem optymalnym w świetle przyjętych kryteriów.
- Stwierdzono, że przysłanianie przekroju wylotowego pierścienia dyszowego nie tylko zwiększa prędkość wylotową, ale również odsuwa strugę od ścian komory, co może redukować zużycie erozyjne elementów młyna.

5. Wkład naukowy i praktyczny

Oryginalnym osiągnięciem Doktoranta jest kompleksowe podejście do problemu aerodynamiki pierścienia dyszowego, który do tej pory był traktowany w literaturze marginalnie.

Do najważniejszych osiągnięć autora należy zaliczyć:

1. **Wkład metodyczny:** Opracowanie spójnej metodologii łączącej badania przemysłowe, modelowe i numeryczne dla specyficznego komponentu młyna.
2. **Rozwój wiedzy:** Wykazanie, że uproszczenie geometrii łopatek (np. łopatki płaskie) może przynieść wymierne korzyści aerodynamiczne bez pogorszenia profilu przepływu.
3. **Wdrożenie przemysłowe:** Wyniki pracy mają bezpośrednie przełożenie na konstrukcję nowych produktów w FPM S.A., co podnosi konkurencyjność polskiego przemysłu maszyn energetycznych.

Doktorant przedstawia szereg oryginalnych stwierdzeń dotyczących konstrukcji pierścienia dyszowego np.: *Zastosowanie niewykonującego ruchu obrotowego pierścienia dyszowego z płaskimi łopatkami nie zmienia znacznie oporów przepływu czynnika przez pierścień dyszowy w stosunku do wariantu bazowego, lecz przełożyło się na zmniejszenie sumarycznych strat przepływu czynnika przez młyn (str 164).*

Jest to dowód na możliwość zmniejszenia stopnia zaawansowania konstrukcji pierścienia dyszowego z uzyskaniem jednoczesnym zmniejszenia oporów przepływu

6. Uwagi i dyskusyjne

1. W 2019 roku Urząd Patentowy RP ogłosił przyznanie PATENTU PL 236439 B1 pod tytułem Pierścień dyszowy młyna miazdzącego. Uprawnionym z patentu jest firma DOOSAN BABCOCK ENERGY POLSKAS.A. z Rybnika.

Przedmiotem wynalazku jest pierścień dyszowy młyna miażdżącego o pionowej osi obrotu, (kulowego lub rolkowego) stosowanego do rozdrabniania węgla w elektrowniach i elektrociepłowniach.

Autorzy patentu zaproponowali zastosowanie pierścienia dyszowego składającego się z co najmniej z dwóch dysz (dyszy dolnej i dyszy górnej), które mogą być podzielone na segmenty. Proszę o komentarz jak zaproponowane przez Doktoranta rozwiązanie ma się do opisu zawartego w patencie.

2. Drugie pytanie dotyczy stanowiska badawczego, na którym miałam przyjemność prowadzić (1998 r.!!!) badania. Stanowisko badawcze należące do Katedry Maszyn i Urządzeń Energetycznych na Wydziale Mechaniczno – Energetycznym Politechniki Śląskiej wyposażone było w młyn pierścieniowo-kulowy w skali 1:7 młyna przemysłowego RP 1043x produkcji Fabryki Palenisk Mechanicznych (obecnie FPM) z Mikołowa.

Badania były prowadzone dzięki współpracy ze śp. dr Kazimierzem Mroczkim i dr Józefem Ciepiałą. Badania prowadzone we współpracy AGH i PŚ obejmowały badania radioznaczkowe (wykorzystanie techniki izotopowych metod radioznaczkowych) do określenia kinetyki rozdrabniania węgla. Przeprowadzony eksperyment czynnikowy obejmował badanie składu ziarnowego nadawy, wielkości nadawy, czasu mielenia oraz wielkość sita podziałowego. Uzyskane model pozwoliły określić granice obniżenia emisji NO_x przez sterowanie badanymi parametrami.

Proszę oszacować, jakie jest możliwe obniżenie emisji NO_x w wyniku wdrożenia zaproponowanej przez Doktoranta modyfikacji pierścienia dyszowego w stosunku do zmian wynikających ze zmiany uziarnienia i ilości nadawy czasu mielenia i ziarna podziałowego.

Jak Doktorant szacuje wyniki badania w skali półtechnicznej w stosunku do symulacji instalacji pełnoskalowej w programie CFD.

Praca jest napisana poprawnie, jednak można sformułować kilka uwag o charakterze dyskusyjnym, które nie rzutują na wysoką ocenę końcową:

- W badaniach laboratoryjnych stosowano wyłącznie zimne powietrze. Choć autor zastosował zasady podobieństwa, procesy zachodzące w rzeczywistym młynie (suszenie węgla, zmiana wilgotności i temperatury) są bardziej złożone i mogą wpływać na gęstość czynnika w sposób trudny do pełnego oddania w skali modelowej,
- Ciekawym uzupełnieniem byłaby głębsza analiza wpływu różnych rodzajów węgla (nie tylko nadawy standardowej) na stabilność profilu przepływu przy minimalnej wentylacji, co jest kluczowe dla bezpieczeństwa przeciwwybuchowego młynów

7. Podsumowanie i konkluzja

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Zalewskiego stanowi dojrzałe studium naukowe i inżynierskie. Autor wykazał się biegłością w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami badawczymi oraz umiejętnością wyciągania konstruktywnych wniosków z dużej ilości danych pomiarowych.

Praca w pełni potwierdza postawioną tezę. Autor udowodnił, że modyfikacja geometrii pierścienia dyszowego pozwala na znaczące obniżenie strat ciśnienia przy zachowaniu (lub poprawie) parametrów transportu pyłu. Jest to bezpośrednia odpowiedź na wyzwania, przed którymi stoi nowoczesna energetyka węglowa współpracująca z OZE.

Konkludując, stwierdzam że przedłożona rozprawa doktorska spełnia wszystkie warunki ustawowe stawiane pracom doktorskim w dyscyplinie **Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny o dopuszczenie mgr. inż. Łukasza Zalewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisała Barbara Tora