

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Kędzierskiego
nt. „Badania eksperymentalne i modelowanie pracy niskoprężnych
strumienic dwufazowych cieczenio-gazowych”

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej w formie maszynopisu opracowanego o objętości 183 strony tekstu, złożonego z 8 rozdziałów i 5 załączników, zawierającego 96 rysunków, 17 tablic oraz 116 pozycji bibliograficznych, zamkniętego redakcyjnie w pierwszej połowie 2022 roku. Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest Uchwała Senatu Politechniki Białostockiej nr 218/XXI/XVI/2022 podjęta w dniu 26 maja 2022 r. Postępowanie w sprawie nadania stopnia doktora jest realizowane zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2022 r., poz. 574).

Wybór tematyki rozprawy

Jakiegokolwiek nowoczesne rozwiązania prowadzące do redukcji, w skali globalnej, emisji gazów cieplarnianych, spalin oraz innych zanieczyszczeń, zmuszają do wnikliwego i kompleksowego spojrzenia pod tym kątem na transport morski. W analizowanych globalnie poziomach emisji, statki mają znaczący udział, szacowany na ponad miliard ton różnego rodzaju zanieczyszczeń.

Próby osiągnięcia standardów emisji zbieżnych z wyśrubowanymi celami środowiskowymi: krajowymi, europejskimi oraz światowymi wyraźnie wskazują, że konwencjonalne metody oczyszczania spalin emitowanych przez jednostki morskie są niewystarczające i nie realizują założeń zrównoważonego rozwoju. Podejmowane w ostatnich latach działania zmierzające do znaczącego ograniczenia ruchu morskiego (i tym samym zmniejszenia emisji) pokazały, że jakiegokolwiek zakłócenia czy ograniczenia w rozbudowanej strukturze zależności globalnych łańcuchów dostaw prowadzą natychmiast do konsekwencji gospodarczych odczuwalnych przez konsumentów we wszystkich zakątkach globu.

Dlatego właśnie uważam, że Doktorant podjął się ważnego, a zarazem bardzo interesującego, złożonego i wieloaspektowego problemu badawczego.

Zakończone sukcesem poszukiwania innowacyjnych rozwiązań technicznych redukujących emisję zanieczyszczeń mogą skutkować zmniejszeniem gabarytów jednostek morskich oraz ilości zużywanego przez nie paliwa. To z kolei może oznaczać korzyści efektywnościowe i wydajnościowe, a więc istotne ograniczenie wpływu transportu morskiego na środowisko w sposób nie skutkujący zakłóceniami sieci zależności i powiązań gospodarczych.

Autor, opierając się na analizie procesów przepływowych spalin i zanieczyszczeń oraz towarzyszących im zjawisk fizycznych i chemicznych, przy jednoczesnym powiązaniu tej wiedzy z wytycznymi konstrukcyjnymi proponuje zastąpienie powszechnie stosowanych na statkach skruberów компактowymi strumienicami cieczenio-gazowymi. Syntetyzując

zagadnienia z obszaru chemii, inżynierii materiałowej, hydrodynamiki oraz termodynamiki podjął się opracowania technicznego strumienicy cieczenio-gazowej, a także stworzenia metody/narzędzia do projektowania takiej strumienicy o zadanych parametrach docelowych i geometrii.

W związku z powyższym **uwazam wybór tematyki rozprawy za ważny i celny**. Poruszane w pracy zagadnienia są trudne, a **uzyskane końcowe rezultaty cechuje aktualność oraz znaczący potencjał aplikacyjny**.

Zawartość pracy

Recenzowana praca doktorska ma charakter przede wszystkim eksperymentalny, choć nie tylko. Badania eksperymentalne strumienicy cieczenio-gazowej zostały wsparte półempirycznym modelem matematycznym sformułowanym na podstawie wiedzy pozyskanej w laboratorium. Autor skonstruował korelacje dla trzech istotnych parametrów mających wpływ na sprawność strumienicy w kontekście jej zastosowania do oczyszczania spalin (tj. współczynnik prędkości w komorze mieszania, długość fali mieszającej oraz na umiejscowienie początku powstawania fali mieszającej w komorze mieszania). Dysertacja została podzielona na osiem rozdziałów o następującej strukturze i zawartości:

Rozdział 1 stanowi ogólne wprowadzenie do tematyki dysertacji. Autor uzasadnia potrzebę oraz założenia wykorzystania strumienic do wytworzenia największej gęstości objętościowej powierzchni rozdziału faz, co prowadzi do opracowania skutecznych kompaktowych urządzeń do oczyszczania gazów spalinowych. Jednocześnie rozdział ten stanowi ramowe wprowadzenie do **Rozdziału 2**, gdzie Doktorant dokonuje kompleksowego przeglądu stanu wiedzy w obszarach strumienic cieczenio-gazowych, fizyki zjawisk zachodzących podczas przepływu cieczy przez strumienice, a także umieszcza swoje badania w szerszym kontekście pochylając się nas uwarunkowaniami systemów oczyszczania gazów spalinowych jednostek morskich.

W **Rozdziale 3** przedstawiono cel oraz tezę pracy omówione szczegółowo w kolejnym punkcie niniejszej recenzji.

Rozdział 4 zawiera opis stanowiska eksperymentalnego (sekcja 4.1) uzupełniony o szczegółowy opis układu kontrolno-pomiarowego (sekcja 4.2). Znalazły się też tutaj opis procedury badawczej (w tym plan eksperymentu oraz metodologia analizy danych) (sekcja 4.3). Na uwagę zasługuje przejrzysty graficzny sposób przedstawienia wszystkich istotnych stosowanych przez Doktoranta algorytmów (rysunki 4.28-4.30 oraz 4.34).

Właściwe wyniki badań eksperymentalnych zostały przedstawione i omówione w **Rozdziale 5**. W szczególności Autor opisuje badanie wpływu lokalizacji dyszy napędowej (sekcja 5.1), rozkładu ciśnień w komorze mieszania (sekcja 5.2), położenia i długości fali mieszającej (sekcja 5.3). W następnej kolejności wyznacza charakterystyki pracy strumienic koncentrując się przede wszystkim na dwóch parametrach: stosunku sprężania oraz stosunku zasysania. Rozdział zamyka analiza eksperymentalna sprawności strumienicy dla analizowanych gazów oraz różnych współczynników zasysania.

W **Rozdziale 6** Autor wykorzystuje wyniki badań eksperymentalnych do opracowania półempirycznego modelu matematycznego strumienicy dwufazowej rurowej. Istotny wkład Doktoranta polega tu na opracowaniu bezwymiarowych korelacji opisujących długość fali mieszającej oraz na umiejscowienie początku powstawania fali mieszającej w komorze mieszania. Autor szczegółowo omawia założenia upraszczające leżące u podstaw opracowanego modelu oraz podaje obowiązujące zakresy zastosowania swoich równań.

Rozdział 7 stanowi omówienie prac badawczych nad prototypowym strumieniowym reaktorem wodno-gazowym do oczyszczania spalin dla silnika o mocy 40 kW. Należy podkreślić, że badania omówione w tym rozdziale zostały zrealizowane w ramach projektu badawczo-rozwojowego (POIR.04.01.02-00-0135/16), którego celem była aplikacja opracowanej technologii w siłowniach jednostek pływających. Wyniki przedstawione w niniejszym rozdziale potwierdzają wysoką skuteczność zaprezentowanego rozwiązania, tzn. zawartość siarki w spalinach spadła z około 40-45 ppm (krótki wydech) oraz 50-60 ppm (długi wydech) do poziomu niemierzalnego.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie oraz wnioski.

Pracę kończy **bibliografia, wykaz tabel i rysunków** oraz **załączniki** (tabela wyników pomiarów, rysunki złożeniowe oraz wykonawcze strumienicy).

Cel i zakres rozprawy

Doktorant sformułował tezę oraz cel pracy opierając się na wnioskach wyciągniętych z analizy stanu wiedzy w Rozdziale 2. Zdefiniował potrzebę oraz naświetlił wyzwania związane z budową reaktora chemicznego przeznaczonego do absorpcji SO₂ w układach oczyszczania spalin dla jednostek morskich. Sformułował hipotezę badawczą zakładającą, że parametry pracy w powiązaniu z geometrią elementów składowych strumienicy (przede wszystkim komory mieszania) w zasadniczy sposób wpływają na jej parametry wydajnościowe w procesie oczyszczania spalin.

Towarzyszący tezie zakres rozprawy wynika z wniosków wyciągniętych przez Autora z przeglądu literaturowego. Doktorant dowiódł istnienia niszy tematycznej oraz wskazał na brak opracowań naukowych dotyczących zastosowania strumienic cieczenio-gazowych w procesie oczyszczania spalin. Zauważył, że przed budową i aplikacją w/w reaktora konieczne jest w pierwszej kolejności przeprowadzenie prac badawczych o charakterze podstawowym oraz zarysował zakres tych prac w sposób odpowiedni do postawionych tez naukowych. Tym samym można stwierdzić, że **zakres rzeczowy rozprawy odpowiada sformułowanym tezom oraz pozwala na uzyskanie rezultatów umożliwiających ich dowiedzenie**. Zaprezentowane i przeanalizowane w dysertacji wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych korespondują ze sformułowanym celem rozprawy.

Uwagi ogólne

Praca doktorska będąca przedmiotem niniejszej recenzji liczy 183 strony (nie uwzględniając załączników). Wyróżnia się oryginalnością tematyczną oraz walorami aplikacyjnymi, co jest szczególnie cenne w przypadku tzw. doktoratów wdrożeniowych. Rozprawa dotyczy zagadnień słabo rozpoznanych, tym bardziej wartościowe jest jednoznaczne wykazanie przez Autora użyteczności i celowości stosowania strumienic do eliminowania zanieczyszczeń.

Szczególnie interesujące jest powiązanie przez Autora dynamicznych uwarunkowań formowania się fali mieszającej w strumienicy z jej geometrią w celu maksymalizacji jej sprawności w kontekście zdolności do redukcji zanieczyszczeń. Dysertacja eksploruje obszary wykraczające poza typowy znany z literatury i z praktyki obszar stosowania strumienic cieczenio-gazowych. Wyróżniłbym w niej przede wszystkim rozbudowaną analizę eksperymentalną działania strumienicy w różnych geometriach komory mieszania oraz konstrukcjach dysz (łącznie 108 konfiguracji). Autor w szczególności, ale zarazem przejrzysty sposób opisuje zastosowaną metodologię badań eksperymentalnych posługując się autorskimi algorytmami (zaprezentowanymi w przystępnej formie graficznej).

Z punktu widzenia poznawczego bardzo wartościowy element dysertacji stanowi wykazanie powiązania pomiędzy zmianą ciśnienia w komorze mieszania, a lokalizacją miejsca formowania się fali mieszającej. Wygenerowane na podstawie wyników eksperymentalnych wykresy, w połączeniu z dokumentacją fotograficzną stanowią interesujący wgląd w procesy hydrodynamiczne zachodzące w komorze mieszania strumienicy.

O jakości warsztatu naukowego Doktoranta świadczy też wyprowadzenie zależności kryterialnych na współczynnik prędkości komory mieszania, bezwymiarową długość fali mieszającej oraz bezwymiarowy współczynnik lokalizacji fali mieszającej.

Godny podkreślenia jest fakt wykorzystania zdobytej wiedzy w praktycznej realizacji i przebadaniu prototypowego sytemu do oczyszczania spalin dla silnika o mocy 40 kW. Spektakularne rezultaty (tj. redukcja zawartości dwutlenku siarki w spalinach w zasadzie do zera) wskazują na poprawność przyjętych założeń, przeprowadzonych analiz teoretycznych jak i zastosowanych metod eksperymentalnych.

Niezwykłe wartościowy aspekt pracy stanowi ścisła współpraca z otoczeniem gospodarczym. Doktorant w pełni wykorzystał możliwości doktoratu wdrożeniowego, a także swoje zaangażowanie w projekt badawczo rozwojowy POIR.04.01.02-00-0135/16. Co ważne, relacja ta nie zakończyła się wraz zamknięciem merytorycznym pracy doktorskiej. Doktorant jednoznacznie wytyczył kierunek w jakim powinny być prowadzone dalsze prace badawcze i wdrożeniowe, a niektóre z tych działań zostały już zainicjowane tj. zostało dokonane zgłoszenie patentowe chroniące omawiane w dysertacji rozwiązanie, a także rozpoczęta budowa węzła wydechu dla silnika o mocy 250 kW.

Podczas szczegółowej analizy recenzowanej dysertacji nasuwają się pewne uwagi natury ogólnej i szczegółowej, które wpływają na końcowe wrażenie i ostateczną ocenę pracy. W mojej opinii w prezentowanej rozprawie:

- Nie wszystkie fragmenty przeglądu literaturowego zostały uzasadnione jako istotne z punktu widzenia tematyki dysertacji. W sekcji poświęconej analizie uwarunkowań zastosowania strumienic cieczerw-gazowych w inżynierii procesowej (str. 24-27), Autor nawiązuje do prac poświęcone różnym substancjom, różnym metodom badawczym (statystyka, eksperyment, numeryka), analizujące odmienne uwarunkowania ciepłno-przepływowe (np. z i bez kondensacji, w obecności lub bez cząstek stałych). Ten fragment przeglądu stanu wiedzy nie jest przeprowadzony w sposób uporządkowany. Autor nie formułuje z niego usystematyzowanych wniosków ani nie nawiązuje do niego w dalszej części dysertacji.
- Dokonując przeglądu stanu wiedzy Doktorant całą uwagę skupił na aspekcie naukowym oraz publikacjach w istotnych czasopismach. Zauważalny jest brak omówienia w dysertacji już istniejących chronionych rozwiązań technicznych, tj. innych patentów i zgłoszeń patentowych. Tym bardziej, że taki przegląd musiał być wykonany na potrzeby dokonanego przez Doktoranta zgłoszenia patentowego.
- Ze względu na eksperymentalny charakter dysertacji podczas lektury odczuwalny jest niedosyt informacji na temat niepewności wykorzystywanych urządzeń i elementów pomiarowych, o zastosowanej metodzie obliczania niepewności pomiarowych oraz obliczonych błędach, czego oczekuje się od opracowań o charakterze eksperymentalnym.

Uwagi szczegółowe

1. Autor określa długość fali mieszającej (sekcja 5.3), którą następnie wykorzystuje do opracowania własnej korelacji (sekcja 6.5). Eksperymentalna długość fali mieszającej

określana jest na podstawie analizy dokumentacji fotograficznej, która jest procesem skomplikowanym i pracochłonnym. W dysertacji została opisana metodologia obróbki normalizacji danych graficznych, nie ma jednak informacji o wynikowej niepewności pomiarowej tego odczytu. **Jaki jest szacowany błąd odczytu długości fali mieszającej i czy może mieć on wpływ na wartości współczynników w opracowanych przez Autora korelacjach?**

2. Wskazując parametry zależne w korelacji na bezwymiarową długość fali mieszającej Doktorant nie uwzględnił liczby Webera, choć wziął ją pod uwagę w korelacji na lokalizację miejsca formowania się fali mieszającej. **Czym była podyktowana ta decyzja? Czy to oznacza, że napięcie powierzchniowe nie ma wpływu na długość fali mieszającej?**
3. W rozprawie nie znalazła się informacja na temat zarejestrowanej podczas pomiaru zmienności analizowanych parametrów (ciśnienia, położenia i długości fali mieszającej). **Czy zmienność długości fali mieszającej lub położenia początku fali mieszającej była na tyle mała, że uzasadniło to założenie istnienia stanu pseudo-ustalonego podczas pojedynczego kilkunastosekundowego pomiaru?**
4. Zgromadzone wyniki każdego pomiaru były uśredniane w celu uzyskania wartości wynikowych stanowiących bazę do dalszych prac modelowych. Z treści pracy wynika, że dotyczy to pomiaru ciśnienia. W jaki sposób zostały potraktowane dane graficzne? **Czy odczytywane z fotografii długość fali i położenie jej początku były w jakiś sposób uśredniane/normalizowane?**
5. Rys. 5.9 i 5.11 pokazujące powiązanie położenia fali mieszającej ze zmianą ciśnienia w komorze mieszania w połączeniu z dokumentacją fotograficzną stanowią interesujący wgląd w procesy hydrodynamiczne zachodzące w komorze mieszania strumienicy. W dysertacji zaprezentowano jednak wyłącznie wykresy dla komory 500 mm. **Jak wygląda to dla pozostałych długości komory mieszania?**
6. Intuicyjnie wydaje się, że dla jeśli komora mieszania strumienicy będzie za krótka, to jej sprawność nie osiągnie wartości optymalnej. Z zamieszczonych w dysertacji z rysunków 5.29-5.34 rzeczywiście wynika, że dla wszystkich badanych rodzajów dysz najniższe sprawności osiągają komory mieszania 300 mm, natomiast dla 500 mm i 700 mm wartości są nawet dwukrotnie wyższe (i do siebie zbliżone). Jednak w Rozdziale 5 (str. 114) odnosząc się do rys. 5.36 Autor dokonuje skrótu myślowego i stwierdza, że „długość komory mieszania w strumienicy nie ma zasadniczego wpływu na jej sprawność”. **Wskazane jest uszczegółowienie i wyjaśnienie tego wniosku.**

Uwagi edytorskie

Bibliografia – źródła, których omyłkowo nie ma w bibliografii: Yan Cao et al. (2010), Chuan et al. (2020), Daset et al. (2006), Wang et al. (2020), Shuai Yang et al. (2019), Chen et al. (2018), Zhang et al. (2005), Heidl et al. (2020), Bing et al. (2018). Błędnie zacytowany artykuł Balamurugan et al. – jest z (2007), podczas gdy Autorowi chodziło o konfiguracje eżektorów analizowane przez tę grupę badaczy w pracy z (2008) roku. Kilka źródeł zostało powtórzonych: Das et al. (2006)

Liczne literówki (np. „dyspensja”, „prze(z)”, podwójne spacje, spacje przed przecinkiem lub przed kropką, itp.

Opisy na niektórych rysunkach są nieczytelne ze względu na bardzo małe wielkości czcionek, np. algorytm na rys. 4.30 lub opisy osi na rys. 6.5. To samo dotyczy detali na rys. 7.1.

Nieustandaryzowany format tabel, np. porównanie tabel 4.3, 2.1, 5.3, 6.1 oraz 7.2

- Braki w nomenklaturze, np. nie opisano: współczynnika zasysania „ χ ”
- Str. 13 – Autor odnosi się do rysunku 2.1 sformułowaniem „na zdjęciu 2.1”
- Str. 15 – odniesienie do „zdjęcia 2.1”, powinno być „rysunku 2.2”
- Str. 16 – indeks „vi” (którego nie ma w nomenklaturze), zamiast „gi”
- Str. 21 – jest „na schemacie 2.3” powinno być „na rysunku 2.3”
- Str. 21 – mg, ml, zamiast m_g , m_l
- Str. 22 – brakuje „średnicy komory mieszania” w definicji stosunku „komory mieszania do średnicy dyszy”
- Str. 24 – nie została prawidłowo oznaczona sekcja „Analiza uwarunkowań zastosowania strumienic spalinowych cieczowo-gazowych w inżynierii procesowej” – powinna mieć numer 2.3.
- Str. 39 – mylący tytuł Rozdziału 3, który zawiera dużo więcej materiału niż tylko opis stanowiska badawczego.
- Str. 94 - dane w Tabelach 5.3 oraz 5.4 są nieczytelne.
- Str. 147 – rysunek 6.5 pokazuje wartości wymiarowe, a nie bezwymiarowe co wynikałoby z opisu.

Podsumowanie

Omówione powyżej uwagi krytyczne oraz polemika nie umniejszają wartości merytorycznej opiniowanej pracy doktorskiej, którą oceniam bardzo pozytywnie. **Dysertacja odzwierciedla wiedzę i umiejętności Autora w tematyce budowy strumienic oraz znajomość fundamentalnych zjawisk przepływowych zachodzących w ich komorach mieszania.** Doktorant zademonstrował doświadczenie i umiejętności projektowe oraz konstrukcyjne. Wykazał się warsztatem naukowym, w tym prowadzeniem systematycznych badań eksperymentalnych oraz wykorzystaniem opisu matematycznego do przekształcenia zgromadzonych danych w korelacje kluczowych parametrów.

Należy podkreślić, że wybrany przez Doktoranta przedmiot rozprawy bardzo dobrze realizuje oczekiwania stawiane doktoratom wdrożeniowym. Fakt zaangażowania w prace badawcze przedsiębiorstwa, które ma zdolności techniczne i finansowe do przeprowadzenia wdrożenia jednoznacznie korzystnie wpłynął na prace badawcze oraz decyzje techniczne i konstrukcyjne podejmowane przez Autora. Innowacyjny charakter zaprezentowanych w Rozdziale 7 pracy rezultatów dopełnia ochrona wynalazku zapewniona wykonanym zgłoszeniem patentowym. **To osiągnięcie stanowi oryginalny wkład Autora w rozwój dyscypliny Inżynieria Mechaniczna** i usprawiedliwia twierdzenie, że **doktorant wykazał się wiedzą oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.**

W świetle powyższego **stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Mateusza Kędzińskiego** zatytułowana „Badanie eksperymentalne i modelowanie pracy niskoprężnych strumienic dwufazowych cieczowo-gazowych” **spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r., poz. 574) i dlatego wnioskuję o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

Treść pracy jest zgodna z dyscypliną naukową **Inżynieria Mechaniczna.**

