



AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

dr hab. inż. Paweł Madejski, prof. AGH

Kraków, 10.06.2023 r.

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Katedra Systemów Energetycznych

i Urzędzeń Ochrony Środowiska

al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

e-mail: pawel.madejski@agh.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Ebrahima Nadimi Karamjavan
zatytułowanej **"Experimental and numerical study on ammonia fueled
compression ignition engine"** wykonanej pod pieczę promotora
dr hab. inż. Grzegorza Przybyły, prof. PŚ.

1. Podstawa opracowania

Recenzja wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina.

2. Zasadność podjęcia tematu

Praca jest poświęcona problematyce zastosowania amoniaku jako paliwa w silnikach wysokoprężnych w celu ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery poprzez zredukowanie udziału węglowodorów w procesie spalania. Praca została wykonana w ramach projektu badawczego „*Ammonia as carbon free fuel for internal combustion engine driven agricultural vehicle*” o akronimie ACTIVATE, realizowanego w ramach międzynarodowego konsorcjum naukowego ramach projektu polsko-norweskiego w latach 2020 – 2023 (konkurs finansowany i nadzorowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju NCBiR).

Temat rozprawy koncentruje się na eksperymentalnym i numerycznym badaniu silnika wysokoprężnego napędzanego amoniakiem. Wybór tematu jest bardzo istotny oraz aktualny, biorąc pod uwagę obecny światowy trend zmierzający do dekarbonizacji przemysłu. Zastosowanie amoniaku jako „zielonego paliwa” i wolnego od węglowodorów w silnikach wysokoprężnych stanowi interesującą dziedzinę badań. Najważniejsze wyzwania dotyczą możliwości skutecznego podawania i spalania amoniaku, ale także, znalezienia odpowiedzi jak skutecznie wyeliminować zjawisko niedopalania amoniaku (tzw. poślizg amoniaku), o raz jak ograniczyć tworzenie tlenków azotu NOx. Te kwestie stanowiące pewną lukę badawczą, potwierdzają aktualność i możliwości aplikacyjne wyników przedstawionej do oceny rozprawy. Przedstawiony w rozprawie temat wymagał od Doktoranta szerokiej wiedzy z zakresu badań eksperymentalnych i analizy procesów zachodzących w trakcie spalania paliw w silnikach wysokoprężnych, ale także wiedzy z zakresu badań numerycznych złożonych zjawisk takich jak wielofazowe przepływy turbulentne z reakcją chemiczną i wymianą ciepła. Praca i jej wyniki mogą stanowić cenny materiał dla badaczy zajmujących się zagadnieniami silników spalinowych, szczególnie podczas spalania/współspalania mieszanek paliwowych.

3. Zakres rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Ebrahima Nadimi Karamjavan posiada 97 stron, w tym 6 rozdziałów (39 stron), 4 załączniki (56 stron), które w sumie stanowią główną część rozprawy wskazanej przez Doktoranta. Ponadto w pracy można znaleźć wykaz skrótów, streszczenie w języku angielskim, oraz bibliografię składającą się z 29 pozycji literaturowych. Rozprawa została napisana w języku angielskim.

Rozprawa opiera się na czterech recenzowanych i opublikowanych artykułach w latach 2022 – 2024, których Doktorant jest głównym i pierwszym autorem. Prace są bezpośrednio związane z badaniami silnika wysokoprężnego napędzanego amoniakiem.

Rozdział 1 „Introduction” to 3 stronicowy wstęp wprowadzający do zagadnień poruszanych w rozprawie, zawierający motywację dla podjętych badań. W tym rozdziale Doktorant przedstawia główny cel rozprawy, którym jest **„Opracowanie wysokoprężnego silnika zasilanego amoniakiem poprzez modernizację silnika diesla z pojedynczym cylindrem”** („Therefore, the main objective of the thesis is to develop an ammonia fueled CI engine by retrofitting the single cylinder diesel engine”), tezę rozprawy mówiącą, że możliwe jest **„polepszenie spalania, redukcja emisji oraz**

poprawa efektywności wysokoprężnego silnika zasilanego amoniakiem w porównaniu z tradycyjnym silnikiem diesla” (*„The overall goal is to enhance combustion, reduce emissions, and improve the performance of ammonia-fueled CI engine compared to traditional diesel engine”*). Aby potwierdzić postawioną tezę, Autor wymienia zakres i cele prac badawczych, które należy zrealizować a są one następujące:

- Eksperymentalne wykorzystywanie amoniaku jako paliwa pierwotnego oraz biodiesla lub oleju napędowego jako wtórnego paliwa pilotażowego w silniku wysokoprężnym (CI). (*The experimental development for using ammonia as primary fuel, and biodiesel or diesel as a secondary pilot fuel in CI engine*).
- Opracowywanie i zbadanie dwa różnych podejść do wykorzystania amoniaku, poprzez modernizację jednocylindrowego silnika wysokoprężnego. Pierwsza strategia obejmuje wprowadzenie gazowego amoniaku do kolektora wlotowego, drugą zaś jest bezpośrednie wstrzyknięcie ciekłego amoniaku do cylindra z podwójnym wtryskiem. (*Developing and investigation two different approaches for utilization ammonia, by retrofitting a single-cylinder diesel engine. The strategy involves the introduction of gaseous ammonia into the intake manifold, whole the second strategy is direct injection of liquid ammonia into cylinder in dual injection engine*).
- Testowanie wpływu wymiany paliwa poprzez zastąpienie oleju napędowego amoniakiem dla maksymalnego możliwego udziału w silniku wysokoprężnym. Wydajność silnika i emisyjność są eksperymentalnie badane dla różnych udziałów olej napędowa z amoniakiem i porównane z trybem spalania samego oleju napędowego. (*Testing the impacts of replacing diesel fuel with ammonia to the maximum possible substitution in the CI engine. Therefore, engine performance and emission of characteristics are experimentally studied for various ammonia-diesel ratios and compered with pure diesel mode*).
- Badanie parametrów wtryskiwania zarówno ciekłego amoniaku, jak i biodiesla. Badania poddany jest czas iniekcji amoniaku i biodiesla w celu optymalizacji efektywności silnika oraz zmniejszenia emisji. (*Investigation of injection parameters for both liquid ammonia and biodiesel. Therefore, injection timing of ammonia and biodiesel are studied to optimize engine performance and reduce emissions*).
- Podczas stosowania biodiesla jako paliwa pilotażowego o niskim strumieniu masowym, liczba dysz w wtryskiwaczu biodiesla jest blokowana w celu poprawy

wtrysku, a tym samym zmniejszenia emisji. *(Since biodiesel is employed as pilot fuel with low injected mass, the number of nozzles in biodiesel injector are blocked to improve injection and thus reduce emissions).*

- Opracowanie modelu 1D do analizy silnika wysokoprężnego napędzanego amoniakiem. *(Development of a 1D model to analyze ammonia-fueled CI engine).*
- Opracowanie i walidacja modelu CFD zarówno dla silnika wysokoprężnego zasilanego biodieslem, jak i mieszanką biodiesla z amoniakiem. Model CFD jest opracowywany do badania rozpylenia amoniaku i spalania, a także przewidywania lokalnej temperatury i emisji, takich substancji jak CO₂, CO, NO_x i NH₃. *(The development and validation of a CFD model for both pure biodiesel and ammonia biodiesel CI engine. The CFD model is developed to study ammonia spray and combustion, as well as to predict local temperature and emissions such as CO₂, CO, NO_x and NH₃).*

Uważam, że cel, teza oraz zakres prac badawczych są znaczące, obszerne i dobrze dobrane. Cele są kompleksowe i mają znaczący potencjał dla rozwoju oraz zrozumienia możliwości stosowania amoniaku jako zielonego paliwa dla silników wysokoprężnych.

Rozdział 2 zatytułowany „Paper I: Experimental development and port injection of ammonia, discusses the retrofitting of the diesel engine for dual fuel operation with gaseous ammonia and biodiesel” posiada 5 stron, 3 rysunki i wraz z publikacją (Załącznik A1) przedstawia eksperymentalną konfigurację i omawia urządzenia oraz aparaturę zastosowane w eksperymencie. W tym rozdziale omówiono badania przeprowadzone w celu zbadania skutków stosowania amoniaku jako głównego paliwa spalanego wraz z biodieslem, w trybie podwójnego paliwa. Efektywność i emisja zostały omówione podczas pracy silnika przy różnych obciążeniach.

W rozdziale 3 „Paper II: Port injection of ammonia with diesel and 1D model”, który składa się z 9 stron, posiada 6 rysunków oraz 1 tabelę, Doktorant omawia badania skutków zastępowania oleju napędowego amoniakiem, dla pracy silnika wysokoprężnego przy pełnym obciążeniu. Autor bada maksymalny możliwy udział oleju napędowego w mieszance paliwowej, jak również wyznacza efektywność silnika oraz charakterystykę emisji dla różnych udziałów oleju opałowego i amoniaku. Ponadto dyskusja obejmuje problem emisji CO₂ w celu wykazania skuteczności redukcji tego gazu podczas stosowania, uwzględniając emisję N₂O. Do badań Doktorant wykorzystuje opracowany model 1D w programie AVL Boost, wcześniej walidowany z dostępnymi wynikami eksperymentalnymi.

Rozdział 4 „Paper III: Direct injection of liquid ammonia and CFD model, explores the direct injection of liquid ammonia with biodiesel, and the CFD model” zawierający 7 stron, 5 rysunków poświęcony został badaniom podwójnego bezpośredniego wtrysku ciekłego amoniaku i biodiesla do cylindra silnika. Badania mają na celu ocenę wpływu wtrysku ciekłego amoniaku na proces spalania, na emisję oraz na efektywność silnika, poprzez porównanie uzyskanych wartości z wynikami dla spalania czystego biodiesla. Ponadto Doktorant bada różne czasy wstrzyknięcia amoniaku w celu poprawy efektywności procesu spalania mieszanki amoniaku/biodiesla i zmniejszenia emisji. Dodatkowo w rozdziale znajdują się wyjaśnienia dla przygotowanego modelu CFD, opracowanego w celu wykonania analiz numerycznych zjawiska rozpylenia amoniaku, procesu spalania, propagacji płomienia, tworzenia się emisji i wykazania powodów niedopalania amoniaku.

Rozdział 5 „Paper IV: Biodiesel injector configurations, which investigates the influence of biodiesel injector configuration” składa się z 5 stron, 4 rysunków, a Doktorant analizuje w nim, w jaki sposób konfiguracja i zmniejszona liczba dysz we wtryskiwaczu biodiesla wpływają na efektywność, spalanie i emisję podczas podwójnego bezpośredniego wtrysku ciekłego amoniaku i biodiesla. Dodatkowo w rozdziale Autor bada różne czasy wstrzykiwania dla biodiesla.

Ostatni rozdział to „Summary and Conclusions”, został przedstawiony na 3 stronach i zawiera 1 rysunek. Zawiera podsumowanie zrealizowanych zadań w ramach pracy oraz podsumowanie najważniejszych wyników i wniosków z rozprawy doktorskiej.

Przedstawiony podział rozprawy na poszczególne rozdziały jest właściwy, wprowadza do tematyki, przedstawia poszczególne zrealizowane zadania w sposób chronologiczny, jak również omawia badania prowadzone przez Doktoranta. Przedstawiony cel pracy jest zgodny z tematem rozprawy, a wymieniony zakres wyczerpuje tematykę przedstawioną w tytule rozprawy.

4. Uwagi krytyczne i redakcyjne

Poniżej przedstawiam uwagi krytyczne:

- We wstępie do rozprawy (rozdział Introduction) Autor w sposób mało szczegółowy omawia dotychczasowy stan zagadnienia, w celu wskazania aktualnego etapu rozwoju oraz stanu zaawansowania w jakim obecnie znajdują się prace badawcze (eksperymentalne i numeryczne) nad możliwościami zastosowania amoniaku w silnikach wysokoprężnych. Co prawda, przegląd literatury znajduje się w poszczególnych publikacjach przedstawionych do oceny, jednakże wskazane jest omówienie i podkreślenie innowacyjności stosowanych metod oraz rozwiązań w prowadzonych badaniach. Przedstawiona w części głównej rozprawy bibliografia jest uboga, jak również warto zauważyć, że w ostatnich 5 latach powstało więcej publikacji w tym zakresie, co mogłoby stanowić dodatkowe źródło informacji i wskazówek dla dalszych badań.
- Na stronie 12, Doktorant przedstawia opis matematyczny zastosowania pierwszej zasady termodynamiki dla scharakteryzowania pracy silnika. Opis matematyczny i zastosowane symbole nie pokrywają się z informacjami przedstawionym na rysunku 3.1, który to Doktorant wykorzystuje do zobrazowania zastosowanych formuł. Poza tym, omawiany przez Doktoranta proces jest procesem cykliczny, czyli składa się z różnych etapów, co należałoby uwzględnić w opisie matematycznym oraz poprzez szczegółowy rysunek ze schematem i etapami procesu.
- Dlaczego bezpośrednio wstrzyknięcie ciekłego amoniaku spowodowało niższą emisję NO_x niż w przypadku dodawania gazowego amoniaku? Co wpłynęło na taki wynik, czy należy się spodziewać takiego efektu za każdym razem, czy tylko w szczególnym przypadku i dla specyficznych warunków oraz parametrów procesu?
- Brak w rozprawie wystarczającego omówienia założeń dla opracowania modelu numerycznego z wykorzystaniem CFD. Doktorant w sposób ogólny przedstawił przyjęte modele i podejścia (strona 24: model turbulencji w połączeniu z solver'em Lagrangian, model rozpadu sprayu, model kolizji cząstek, korelacja dla odparowania, model wymiany ciepła O'Rourke-Amsden), podczas gdy ich wybór mógł okazać się znaczący na jakość otrzymanych wyników.

Uwagi o charakterze redakcyjnym dotyczą głównie sposobu omawiania technicznych procesów i zagadnień poprzez stosowanie wielu skrótów myślowych wynikających prawdopodobnie z przyjętego żargonu technicznego jak np. częste stosowanie określenia

„diesel” w rozumieniu typu silnika lub rodzaju paliwa, np. tworzenie emisji lub pomiary emisji, podczas gdy w rozprawie doktorskiej, nazewnictwo powinno opierać się na naukowych pojęciach z ograniczeniem inżynierskich skrótów myślowych. W rozprawie brakuje również streszczenia i tytułu rozprawy w języku polskim. Wszystkie wymienione uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej rozprawy.

5. Ocena rozprawy i wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny praca doktorska jest starannie przygotowana, a wyniki zostały już wcześniej opublikowane w znaczących czasopismach naukowych takich jak International Journal of Energy Research, Journal of Energy Institute czy Energy. Poziom językowy oraz redakcyjny jest wysoki, praca klarowna i przejrzysta, chociaż niepozbawiona błędów czy skrótów myślowych. Struktura pracy tworzy spójną i logiczną całość.

Doktorant sformułował cel pracy w sposób precyzyjny i zrealizował go w pełni. Zastosowane eksperymentalne i numeryczne metody badawcze skutecznie umożliwiły osiągnięcie postawionego celu pracy. Poprzez analizy eksperymentalne i numeryczne Doktorant wniósł wkład w zrozumienie warunków pracy silników wysokoprężnych napędzanych amoniakiem. Przeprowadzone kompleksowe badania podkreślają umiejętności i biegłość kandydata w rozwiązywaniu złożonych wyzwań związanych z wykorzystaniem alternatywnych paliw w silnikach spalinowych. Prace wykonywane przez kandydata wykazują znaczący wkład w tę dziedzinę.

Jako najważniejsze osiągnięcia Doktoranta w przedstawionej do recenzji rozprawie należy wskazać przede wszystkim:

1. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych pracy silnika wysokoprężnego zasilanego amoniakiem, przy różnych jego udziałach oraz różnych technikach podawania paliwa.
2. Budowę modelu numerycznego i przeprowadzenie obliczeń CFD pracy silnika w trakcie spalania amoniaku wraz z eksperymentalną walidacją wyników.
3. Przeprowadzenie szczegółowych analiz wpływu konfiguracji parametrów silnika dla poprawy efektywności procesu spalania i zminimalizowania emisji zanieczyszczeń gazowych oraz niespalonego amoniaku.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy, a Doktorant zrealizował postawione sobie podstawowe cele. Przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonych celów.

Rozprawa doktorska mgr inż. Ebrahima Nadimi Karamjavan pt. „*Experimental and numerical study on ammonia fueled compression ignition engine*” będąca przedmiotem recenzji i oceny, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną kandydata w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka wraz z umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Praca spełnia w całości warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2022 r., poz. 574 z późn. zm.).

W oparciu o powyższe stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisał Paweł Madejski