dr hab. inż. Jarosław MAMALA, prof. uczelni
Katedra Pojazdów
Wydział Mechaniczny
Politechnika Opolska
ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole
e-mail: j.mamala@po.opole.pl

19 października 2020r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgra inż. ***Macieja Siedleckiego***

pt.
„Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach eksploatacji"

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej z dnia 28.09.2020 roku (nr DR-63/576/1/2020).

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Opiniowana praca została wykonana na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Jerzego Merkisza i promotora pomocniczego Pana dr inż. Łukasza Rymaniaka. Jej przedmiotem jest, zgodnie z tytułem, analiza oceny emisji cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Analizę przeprowadzono na specjalnie do tego celu przygotowanych prototypowych filtrach o założonych parametrach i obliczonej geometrii, pokrytych materiałem reaktywnym, stanowiącym nośnik do procesu oczyszczania spalin. Stworzono siedem filtrów, o zróżnicowanej budowie dopasowanych do różnej objętości skokowej badanych silników spalinowych. Badane silniki spalinowe stanowiły wyposażenie nie tylko hamowni silnikowej Politechniki Poznańskiej ale również zamontowane były w pozadrogowych maszynach roboczych, które poddano badaniom w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Tego typu układy oczyszczające spaliny w silnikach maszyn roboczych starszego typu, stanowią alternatywę w zakresie możliwości obniżenia ich emisji substancji szkodliwych w tym również cząstek stałych (PM) i ich liczby (PN). Wzrost świadomości ekologicznej, ale także przedstawione w pracy rozwiązanie legislacyjnie powodują, że użytkownicy tego typu maszyn poszukują rozwiązań pozwalających na wydłużenie okresu eksploatacji już sprawdzonych maszyn roboczych. Bowiem pomimo znacznego postępu w konstrukcji silników spalinowych i budowie układów oczyszczania spalin, oprócz własności ekologicznych liczą się własności ekonomiczne, czego skutkiem jest ich ciągle wydłużający się okres eksploatacji. Jest to niezwykle istotne, aby operator maszyny roboczej mógł pracować w warunkach bezpiecznych dla jego zdrowia, ale również aby

ona w jak najmniejszym stopniu negatywnie oddziaływała na środowisko naturalne. Dlatego zagadnienie przedstawione w pracy jest niezwykle istotne z inżynierskiego podejścia do projektowania układu pasywnego retrofittingu dla konkretnego silnika spalinowego, bowiem właściwe zamodelowanie procesu przepływu spalin przez filtr zwiększa skuteczność jego działania w rzeczywistych warunkach, a przy tym skraca czas jego opracowania.

Mimo wielu publikowanych prac badawczych i teoretycznych, niniejsza tematyka nie jest w pełni wyjaśniona i jest ciągle rozwijana. Szczególnie na rynku wtórnym, różnego rodzaju firmy produkujące pozasilnikowe układy oczyszczające spaliny, szukają informacji na ten temat, jednocześnie chroniąc swoje rozwiązania techniczne przed skopiowaniem. Z tego względu podjęta tematyka naukowego podejścia do rozpatrzenia problematyki oceny emisji cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu, należy uznać za słuszną i powinna ona zostać rozpatrzona. Realizacja założonego celu pracy wymagała od autora, nie tylko przeprowadzenia gruntownej analizy literatury tematu, zamodelowania pracy układu w programie ANSYS, wykonania praktycznego filtrów, ale także przeprowadzenia szczegółowych badań na hamowni silnikowej, które następnie zweryfikowano w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyn roboczych. Jest to bardzo celowe i uzasadnione, od projektu przez badania i weryfikację, nie tylko z naukowego punktu widzenia ale i praktycznego, z możliwością implementacji wyników pracy bezpośrednio w firmach zajmujących się produkcją tego typu filtrów.

Problematyka zrealizowana w tak szerokim ujęciu jest możliwa dzięki wysokiej specjalizacji Instytutu Silników Spalinowych i Napędów, a także wielu wcześniejszych prac promotora rozprawy prof. dr hab. inż. Jerzego Merkisza. Jak wynika, zarówno z przedstawionej literatury, syntetycznego wstępu ale również z własnego doświadczenia recenzenta, tego typu eksperymentalne prace badawcze wymagają znalezienia nowej przestrzeni w pozasilnikowych metodach oczyszczania spalin. Dlatego arbitralnie, dobrze, zaplanowano ograniczoną liczbę punktów pomiarowych odnoszących się do badanych siedmiu filtrów i trzech silników spalinowych. Tematyka podjęta w niniejszej rozprawie jest aktualna a jej cel i zakres są wybrane bardzo trafnie. Wybór tematu uważam za słuszny i ciekawy, a przede wszystkim praca ma walory poznawcze przez zrealizowanie własnych badań w różnych warunkach eksploatacji. Stąd rozprawa doktorska mgra inż. Macieja Siedleckiego pt. *„Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach"*, utylitarnie uzupełni stan wiedzy na temat pozasilnikowych metod oczyszczania spalin w pojazdach pozadrogowych, a na płynące z niej wnioski istnieje obecnie zapotrzebowanie również w obszarze praktycznego zastosowania.

2. Zawartość pracy i układ rozprawy

2.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska składa się z czterech zasadniczych części.

Pierwsza teoretyczno-organizacyjna zawierająca 37 stron, w tym strona tytułowa, spis treści, streszczenie w języki polskim i angielskim, wykaz ważniejszych skrótów i symboli, wprowadzenie oraz rozdział drugi i trzeci. Rozdział drugi, opisuje emisję składników szkodliwych w spalinach a trzeci opisuje regulacje prawne dotyczące ich ograniczenia.

Druga analityczna, zawierająca 13 stron tj. rozdziały czwarty i piąty. Rozdział czwarty to cel i zakres pracy a piąty to badanie emisji substancji szkodliwych w spalinach w rzeczywistych warunkach eksploatacji.

Część trzecia konstruktorska jest zawarta w dwóch rozdziałach szóstym i siódmym i liczy 22 strony. Rozdział szósty dotyczy badań symulacyjnych a siódmy jest poświęcony technologii wykonania filtrów.

Ostania czwarta część eksperymentalna, zawiera również dwa rozdziały i liczy 24 strony. Rozdział ósmy dotyczy badań weryfikacyjnych a dziewiąty stanowi podsumowanie badań i całej pracy.

Na końcu pracy jest zawarta literatura licząca 106 pozycji, z czego 4 współautorstwa autora rozprawy, co warte podkreślenia 88 pozycji opublikowano po roku 2010, a 11 pozycji jest z roku 2020.

Rozprawa doktorska mgra inż. Macieja Siedleckiego pt. *„Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach"* jest osiągnięciem Autora w zakresie objętym tytułem i zawiera elementy autorskie, istotne w dyscyplinie inżynierii lądowej i transportu. Autor dokonał praktycznego podziału pracy na części, które ujął w dziewięciu rozdziałach a recenzowana rozprawa ma charakter konstrukcyjno-eksperymentalny.

W rozdziale pierwszym pt. *„Wprowadzenie"*, znajduje się krótkie ale zwarte kompendium wiedzy, które wprowadza czytelnika do treści rozprawy oraz jasno definiuje ideę retrofittingu jako cyt. „Retrofitting maszyn non-road to proces doposażania konstrukcji będących w eksploatacji, wyprodukowanych zgodnie ze starszymi normami homologacyjnymi w nowoczesne układy oczyszczania spalin, bez wprowadzania zmian konstrukcyjnych w silniku". W rozdziale zwrócono również uwagę na ekonomiczne aspekty stosowania tej metody oczyszczania spalin.

Rozdział drugi pt. *„Emisja składników szkodliwych spalin z pojazdów o zastosowaniu pozadrogowym"* określa najważniejsze informacje dotyczące emisji składników szkodliwych w spalinach. Przedstawiono ich charakterystykę oraz opisano metody ograniczenia emisji, które podzielono na:

- silnikowe,
- pozasilnikowe.

Rozdział trzeci pt. *„Regulacje prawne dotyczące ograniczania szkodliwych składników spalin z pojazdów o zastosowaniu pozadrogowym"* prezentuje aktualny stan wiedzy i zawiera informacje prawne. Opisuje również przyjęte regulacje prawne przez lokalne społeczności, które zastosowano m.in. w Londynie i Berlinie. Ze względu na charakter rozprawy odniesiono się do kwestii pomiaru emisyjności dla maszyn roboczych. Zwrócono również uwagę na retrofitting jako sposób ograniczenia emisji substancji szkodliwych w spalinach.

Rozdział czwarty pt. *„Cel i zakres pracy"* określa cel główny, którym jest ***„Opracowanie i wytworzenie filtra cząstek stałych przeznaczonego do retrofittingu maszyn non-road z oceną skuteczności jego działania"***. Dalej przedstawiono główne etapy niniejszej rozprawy, które podzielono na:

1. Opracowanie konstrukcji filtra w środowisku CFD (Computational Fluid Dynamics) na podstawie badań w warunkach rzeczywistych pracy maszyn i wytworzenie prototypów.
2. Badania weryfikacyjne obejmujące wpływ zastosowania autorskiego rozwiązania na emisję związków toksycznych na stanowisku hamownianym.
3. Ocena oddziaływania filtrów zabudowanych na rzeczywistych pojazdach.

Na podstawie scharakteryzowanych etapów prac badawczych, zaproponowano schemat realizacji rozprawy doktorskiej, który przedstawiono na rysunku 4.1. W sposób czytelny i jasny przedstawia tok rozumowania doktoranta, co jest warte podkreślenia.

Rozdział piąty pt. *„Badanie emisji cząstek stałych z eksploatowanych pojazdów o zastosowaniu pozadrogowym"* opisuje metodykę pomiaru emisji jednostkowych substancji szkodliwych zawartych w spalinach. W tym również scharakteryzowano użytą w pracy aparaturę pomiarową. Osobny podrozdział w pracy stanowi, przeprowadzona analiza obciążeń rzeczywistych maszyn roboczych podczas pracy. Analizie poddano dobrze arbitralnie dobrane maszyny robocze, w tym ciągnik rolniczy *Jhon Deer* oraz koparkę *CAT,* przedstawiając ich emisję rzeczywistą w odniesieniu do obowiązujących norm. Wykazano, że zarówno ciągnik rolniczy jak i koparka w rzeczywistych warunkach eksploatacji znacznie przekraczają bezwzględną wartość emisji cząstek stałych (PM) a także limit ilości cząstek stałych (PN) w odniesieniu do obecnie obowiązujących limitów, przy jednoczesnej znacznej ilości cząstek stałych o małej średnicy. Jest to bardzo niebezpieczne dla zdrowia człowieka i operatorów maszyn roboczych.

Rozdział szósty pt. *„Opracowanie wirtualnego modelu filtra przeznaczonego do retrofittingu maszyn pozadrogowych"*– koncepcyjno-konstrukcyjny, opisuje kolejny etap realizacji pracy, a dotyczy przeprowadzenia analizy numerycznej przepływu przez zaprojektowaną konstrukcję filtra cząstek stałych oraz opracowanie geometrii kanałów przepływowych. Głównym założeniem jest minimalizacja oporu i zwiększanie sprawności zatrzymywania cząstek stałych na powierzchniach wewnętrznych w funkcji parametrów nośnika porowatego. Na podstawie otrzymanych w ramach niniejszego rozdziału badań symulacyjnych modelu filtra cząstek stałych, wykonano prototypowy filtr rzeczywisty, który poddano badaniom eksperymentalnym. Wyniki przedstawiono za pomocą programu Post-cfd w programie Ansys. Wybierany model ma najkorzystniejsze wartości spośród czterech analizowanych, którymi powinna charakteryzować się warstwa porowata oraz geometria, ze względu na minimalizację strat ciśnienia oraz efektywność zatrzymywania cząstek stałych. Całość rozdziału kończy podsumowanie, gdzie sformułowano siedem głównych wniosków, przy czym siódmy odnosi się do *wybranej geometrii służącej do stworzenia rzeczywistego nośnika filtra DPF, którym jest model 4 z danymi z przypadku D04 jako połączenie wysokiej filtracji i niskiego oporu przepływu.*

Rozdział siódmy pt. *„Opracowanie prototypów filtrów cząstek stałych"* bardzo intrygujący, który przedstawia krótki opis kilkuetapowego procesu powstawania filtra. W ramach pracy wykonano siedem różnego rodzaju filtrów, które różniły się objętością nośnika reakcyjnego, co zostało przedstawione w tabeli 7.1. Warte podkreślenia jest to, że wykonanie filtra odbyło się we współpracy z przedsiębiorstwem produkcyjnym, co można traktować jako przykład współpracy nauki i biznesu. Niestety szczegóły procesu produkcyjnego filtrów jak również dokładny opis składu warstwy reakcyjnej, podlegają ochronie patentowej i są objęte tajemnicą handlową firmy, i nie zostały ujawnione w pracy.

Rozdział ósmy opisuje badania własne i zatytułowany jest " *Badania weryfikacyjne*", rozpoczyna się od opisu badań na hamowni silnikowej Politechniki Poznańskiej według zmodyfikowanego cyklu NRSC–PUT, w dwóch stanach termicznych silnika spalinowego. W przypadku emisji masy jak i liczby cząstek stałych zaobserwowano skuteczność działania filtra dla wszystkich analizowanych punktów pracy silnika spalinowego na tle jego charakterystyki prędkościowej. Spektakularne jest również zmniejszenie ilości cząstek o najmniejszych średnicach.

Następnie przeprowadzono analizę emisji zanieczyszczeń z opracowanymi filtrami z wytypowanymi maszynami roboczymi. W badaniach poligonowych analizowano również

wpływ objętości filtrów na proces oczyszczania i analizowaną skuteczność filtrów. Przy czym w każdym cyklu pomiarowym wykonano dwa cykle testowe: bez i z zamontowanymi prototypowymi filtrami w układzie wylotowym dla celów porównawczych. Stąd przedstawione w pracy wyniki są ujęte jako względna emisja względem układu pierwotnego. Co jest typowym sposobem prezentacji wyników eksperymentalnych wskazującym na skuteczność analizowanego w pracy układu prototypowego. Tu również odnotowano zwiększoną skuteczność oczyszczania spalin w układzie wylotowym. Wyjątkiem jest jeden punkt pracy dla wyższych prędkości obrotowych wału korbowego silnika a niskiego obciążenia, gdzie emisja tlenku węgla szczególnie wzrasta dla ciągnika rolniczego.

Ciekawy z punktu widzenia, realizacji pracy jest ostatni podrozdział 8.3 opisujący analizę emisji cząstek stałych w spalinach w tym PM i PN w odniesieniu do maszyny roboczej spełniającej normę Stage IIIB. W podrozdziale porównano wyznaczone emisje jednostkowe zanieczyszczeń dla nowoopracowanych filtrów, w stosunku do przebadanej w rzeczywistych warunkach eksploatacji maszyny roboczej wyposażonej w fabryczny filtr cząstek stałych. W tym przypadku był to ciągnik rolniczy. Wykazano niewielką, mniejszą skuteczność oczyszczania spalin w stosunku do rozwiązań fabrycznych. Co potwierdza zdolność działania zaprojektowanego filtra w stopniu zbliżonym do rozwiązań OEM.

Rozdział dziesiąty, kończący pracę pt. *„Wnioski i kierunki dalszych badań"* zawiera trzy podrozdziały. Podsumowanie podjętej tematyki rozprawy, drugi przedstawia wnioski o charakterze poznawczym a także utylitarnym. Na zakończenie rozprawy przedstawiono plan dalszych badań.

Praca zatem, pomimo jej charakteru naukowego, w znaczącej części (część czwarta pracy) jest eksperymentalno-poznawcza, w której Doktorant konsekwentnie realizuje przyjęty cel naukowy. Doktorant dąży w pełni do poznania efektów wpływu opracowanych filtrów na emisję zanieczyszczeń w spalinach maszyn roboczych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Realizacja tak szerokiego zakresu pracy nie byłaby możliwa, bez dobrze zorganizowanego zaplecza badawczego w Instytucie Silników Spalinowych i Napędów, które Doktorant dobrze wykorzystał. Autor rozprawy określił własny wątek badawczy, co świadczy o dobrze opanowanej wiedzy w zakresie tematu rozprawy, znajomości warsztatu badawczego i potwierdza zdolność Autora do realizacji samodzielnej pracy naukowej.

Podsumowując stwierdzam, że zaproponowany przez Autora układ pracy jest poprawny.

2.2. Ocena merytoryczna i uwagi dotyczące rozprawy

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę oceniam pozytywnie, mimo pewnej dozy domyślności, którą szerzej omówię poniżej. Układ pracy jest logiczny, treści rozprawy odpowiadające tokowi przeprowadzanych analiz i badań (analiza problemu – identyfikacja problemu badawczego – badania symulacyjne i opracowanie filtrów, ich weryfikacja na stanowisku badawczym i badaniach poligonowych – wnioskowanie) jest typowym, klasycznie prawidłowym metodycznie ciągiem czynności badawczych, czyniącym klarowny układ treści pracy. Autor przeprowadził eksperyment naukowy, który potwierdził w badaniach poligonowych, co ma wartość nie tylko naukową ale i utylitarną z możliwością implementacji badań bezpośrednio do przemysłu.

Zasadniczym osiągnięciem Autora, zgodnie z przyjętym celem głównym rozprawy, jest po pierwsze opracowanie i wytworzenie filtra cząstek stałych przeznaczonego do retrofittingu maszyn roboczych non-road. Po drugie przeprowadzenie szeroko

zaplanowanych badań weryfikacyjnych określających ocenę skuteczności ich działania w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Punktem wyjścia do oceny merytorycznej rozprawy jest analiza kluczowych informacji na temat trafności podjętej tematyki rozprawy i jej uzasadnienia, co zostało zapisane krótko w części teoretycznej (rozdziały 1, 2 i 3). W części tej Autor przedstawił wprowadzenie, z którym trudno się nie zgodzić. Jednak podawana informacja, że silniki spalinowe o spalaniu wewnętrznym są głównym źródłem napędu od ponad 100 lat, jest prawdziwa ale nieprecyzyjna. Bowiem rozpatrywany silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym został opracowany w roku 1892, a więc ponad 128 lat temu. Autor zwraca uwagę na problem społeczny i ekonomiczny użytkowania maszyn roboczych w gospodarce. Jest on związany ze znacznym średnim wiekiem eksploatowanych maszyn w Polsce, ich stanem technicznym i wykazanym w pracy znacznym przekroczeniem przez te maszyny robocze, aktualnych limitów emisyjnych dla nowoprodukowanych maszyn. W tym kontekście zaproponowana idea stosowania nowoczesnych pozasilnikowych filtrów oczyszczających spaliny jest słuszna. W ślad za tym powinny pójść rozwiązania legislacyjne wprowadzające ulgi dla firm, które je stosują. Niestety przedstawione w pracy regulacje prawne nie idą w tym kierunku, skupiają się na wprowadzeniu kolejnych restrykcji.

Następna część pracy stanowiła wspomniany cel i zakres a także opis badań emisji składników toksycznych spalin z dwóch maszyn roboczych z grupy NRMM. Pomiary emisji wykonano wykorzystując nowoczesną aparaturę pomiarową PEMS (Portable Emission Measurement System). Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazały na nadmierną emisyjność PM (Particulate Matter) i PN (Particulate Number) obydwu maszyn w warunkach rzeczywistych w porównaniu do limitów zawartych w obecnie obowiązujących normach homologacyjnych. W analizie stwierdzono, że warunki rzeczywiste w niewielkim stopniu odwzorowują punkty zawarte w statycznym, homologacyjnym cyklu badawczym. Na tej podstawie, słusznie zdecydowano o modyfikacji cyklu statycznego i opracowaniu nowego zmodernizowanego pod nazwą NRSC–PUT, tak aby lepiej odzwierciedlił rzeczywiste punkty pracy silników w czasie użytkowania maszyn roboczych. Stworzony cykl pracy silnika cykl NRSC–PUT został wykorzystany w dalszej części pracy, do weryfikacji i oceny skuteczności działania proponowanego rozwiązania.

Badania symulacyjne stanowią odrębną, ale integralną z tematyką rozprawy, część pracy naukowej Doktoranta. Wykorzystane dane pomiarowe, a w szczególności zarejestrowana emisja zanieczyszczeń w spalinach oraz ich masowe natężenie przepływu posłużyły do stworzenia geometrii nośnika nowoopracowanego filtra przeznaczonego do retrofittingu, łączącego zalety dwóch najpopularniejszych rodzajów nośników – przepływowego oraz z przepływem przez ściankę. Zależności struktury nośnika, w badaniach symulacyjnych zamodelowano przy użyciu czterech modeli, przepływu gazów wylotowych o rzeczywistym wydatku i składzie w środowisku Ansys. Zadaniem stworzonej geometrii nośnika było zwiększenie skuteczności wyłapywania i utleniania cząstek stałych przy minimalizacji oporów przepływu. Zaletą tej części pracy jest fakt, że prowadzone przez Autora badania symulacyjne, chociaż posiadają pewne uproszczenia i założenia, to nie są spotykane w literaturze branżowej. Możliwość graficznej obserwacji parametrów przepływu spalin o określonym składzie przez filtr za pomocą wektorów odzwierciedlających rozkład prędkości spalin, pozwala na uzyskanie dużo większej ilości informacji niż w przypadku np. pomiarów ciśnienia (np. wskazanie turbulencji i nierównego rozkładu) jak to ma miejsce w rzeczywistym silniku spalinowym. Całość rozdziału kończy podsumowanie, gdzie sformułowano siedem głównych wniosków, przy czym jeden odnosi się do *wybranej geometrii służącej do stworzenia rzeczywistego nośnika*

filtra DPF, którym jest model 4 z danymi z przypadku D04 jako połączenie wysokiej filtracji i niskiego oporu przepływu. Uzupełnieniem tej części pracy, jest na podstawie wybranego modelu geometrii filtra opis procesu technologii jego wykonania. Wytworzenie filtrów odbyło się przy współpracy z przedsiębiorstwem produkującym metalowe nośniki do układów oczyszczania spalin, pozwoliło to nie tylko na sprawdzenie wcześniej wykonanych obliczeń ale dało również możliwość skorzystania z know-how firmy. W ten sposób powstał tak oczekiwany w wielu środowiskach naukowych proces łączenia nauki i biznesu. Stworzono siedem filtrów umożliwiających dopasowanie opracowanego rozwiązania do różnej objętości skokowej silników oraz średnic układów wylotowych maszyn roboczych.

Ciekawe są też badania eksperymentalne wykonane na realnych maszynach roboczych, pozwalające na weryfikację wpływu zastosowanych filtrów na skuteczność oczyszczania spalin z tych silników. W trakcie badań weryfikacyjnych analizowano zawartość i właściwości cząstek w spalinach, początkowo podczas badań na hamowni silnikowej, a następnie w badaniach poligonowych w rzeczywistych samojezdnych maszynach roboczych non-road w warunkach statycznych. Analizę przeprowadzono porównawczo w odniesieniu do maszyn bez filtrów, emisji PM i PN. Na końcu porównano otrzymane wyniki emisji bezwzględnej w odniesieniu do maszyny fabrycznie wyposażonej w filtr cząstek stałych. W pracy przedstawiono również szczegółowe wyniki względnej emisji jednostkowej związków gazowych (węglowodorów oraz tlenku węgla) w poszczególnych punktach pracy.

Analiza wyników, a także porównanie skuteczności działania filtrów, w końcowej części pracy pozwoliło na podsumowanie pracy i wysnucie wniosków końcowych nt. działania zaprojektowanego filtra. We wnioskach jednoznacznie stwierdzono, że umieszczenie w układzie wylotowym filtra cząstek stałych z metalowym nośnikiem w znaczny sposób przyczynia się do ograniczenia emisji zanieczyszczeń w spalinach. Uzyskana skuteczność niewiele ustępowała rozwiązaniom fabrycznym. Zakończenie pracy zawiera sformułowane przez Doktoranta syntetyczne wnioski (w sześciu punktach) o przebiegu dalszych prac badawczych, co należy uznać za Jego dobry kierunek dalszej aktywności naukowej.

Reasumując a także zwracając uwagę na złożoność zakresu badań oraz ich interdyscyplinarność a także osiągnięty cel, zabudowanie siedmiu filtrów, dla realnych silników spalinowych, a także przeprowadzenie badań porównawczych stanowi największą zaletę niniejszej pracy. Dzięki temu praca jest ciekawa, a zastosowane rozwiązania opisywane, zasymulowane, przebadane w laboratorium i na poligonie, przyczynią się do coraz częstszego ich wykorzystania w maszynach roboczych non-road. Wyznaczone kierunki dalszych badań dają duże możliwości rozwoju naukowego, modernizacji i optymalizacji filtrów, wykraczają one poza zakres prezentowany w pracy. Stworzony mariaż nauki i biznesu w tym przypadku jest wzorcowy.

Recenzowana praca Doktoranta mgra inż. Macieja Siedleckiego jest wielowątkowa i bardzo obszerna tematycznie, a jej aspekt poznawczy jest utylitarny przy czym prezentowane wyniki uzupełniają dotychczasowy stan wiedzy. Wymagało to od Autora, niewątpliwie, wiedzy i umiejętności nie tylko z dyscypliny inżynieria lądowa i transport ale również tematyki prowadzenia badań, zestawienia stanowiska badawczego, planowania eksperymentu czy analizy wyników badań. Autor w rozprawie wprowadził własny pomysł na badania eksperymentalne, według opracowanego cyklu badawczego. Świadczy to o dojrzałości naukowo-badawczej Autora rozprawy.

Jednocześnie rozprawa, pomimo zachowania dużej staranności edytorskiej i logicznym ułożeniu tekstu, jest pisana w domyśle, co nie ułatwia recenzentowi śledzenia toku postępowania Doktoranta, co poniekąd wymusił obszerny zakres realizacji pracy.

Szczególnie można to odnieść do prezentowanych w pracy badań porównawczych, których wzór obliczeniowy nie został przedstawiony. Co prawda jest odniesione, że podstawą są spaliny z silnika bez filtra oczyszczającego spaliny, jednak w wielu miejscach w pracy jest odniesienie do skuteczności pracy filtrów wyrażona w procentach, ale czy liczona jest ona od podstawy bezwzględnej czy względnej. Czytając pracę w tym zakresie trzeba było się bardzo skupić, niemniej jednak opisy wyjaśniające są klarowne. Dla przykładu można przytoczyć zdanie *„Wszystkie badane filtry w punkcie pracy 3 uzyskały około 1,5-krotne zwiększenie emisji względnej CO"*, co zostało zilustrowane na rysunku 8.14.

Upraszczając opis procesu spalania paliwa w silniku spalinowym (zapoczątkowany na stronie 11), Doktorant wskazuje, iż główny problem nadmiernej emisji cząstek stałych związany jest ze współczynnikiem nadmiaru powietrza. Można tu prosić Doktoranta, który dokonując opisu silnikowych metod oczyszczania spalin, minimalizujących składniki szkodliwe zawarte w spalinach, o odniesienie się do kwestii emisji dwutlenku węgla CO_2 zawartego w tychże spalinach.

Jedną z głównych wad silników spalinowych, jest ograniczona możliwość przekazywania mocy do układu napędowego i to w ograniczonym zakresie prędkości kątowej jego wału korbowego, w zakresie którym znajduje się punkt maksymalnej sprawności. Z przedstawionych informacji na rysunku 2.1 można wnioskować, iż tego typu silniki nie osiągają sprawności większej niż 25%. Czy przedstawiona sprawność odnosi się do jego wartości maksymalnej?

Ważnym zagadnieniem w metodyce pomiaru emisji jednostkowej zanieczyszczeń zawartych w spalinach czy to objętościowych czy masowych, jest kwestia zawilgocenia spalin. Czy ten aspekt był rozpatrywany przez Doktoranta?

W odniesieniu do przedstawionych punktów pracy maszyny roboczej w tym ciągnika rolniczego i koparki, czy nie byłoby korzystniej przedstawienie ich w funkcji gęstości czasowej w układzie trójwymiarowym?

Odnosząc się do rozdziału 5.2.2 dotyczącego *„Emisji PM i PN w rzeczywistych warunkach ruchu"* oraz opracowanego cyklu NRSC-PUT, nie sposób przywołać badania Panów doktorantów z WEST Virginia University Kappannie, określających emisję drogową dla silników Volkswagena, później określoną mianem afery „Clean Diesel". Czy badając emisyjność seryjnej maszyny roboczej opisaną w podrozdziale 8.3, Doktorant nie ma podobnego wrażenia, że limity homologacyjne nie pokrywają się z emisją eksploatacyjną?

Badania symulacyjne zawsze wzbudzają zainteresowanie czytających. W tym zakresie jest pytanie o uproszczenia przyjęte przy modelowaniu i czy Doktorant brał pod uwagę zjawisko pulsacji ciśnienia w układzie wylotowym, związane z cyklicznością pracy silnika spalinowego? Czy przedmiotowe zjawisko pulsacji ma wpływ na skuteczność zaprojektowanych filtrów?

Kolejną ciekawość wzbudzają badania weryfikujące związane z ustalonymi punktami pracy. Czy zaprojektowane filtry miały wpływ na opory przepływu w układzie wylotowym i jak to wpłynęło na zużycie paliwa? Ponieważ na stronie 84 napisał Pan, *że „zużycie paliwa na biegu jałowym po zastosowaniu filtra o średnicy wlotowej 60 mm (filtr 4) zwiększyło się o około 18%"*, a jak w pozostałych punktach?

W odniesieniu do uwag szczegółowych, związanych z kwestiami edytorskimi, to w pracy występują nieliczne błędy o charakterze redakcyjnym czy stylistycznym, jednak te oznaczono w pracy i bezpośrednio przekazano Autorowi. Powyższe uwagi mają charakter tylko porządkowy i nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, którą uważam za bardzo wartościową.

3. Ocena końcowa

Kończąc chciałbym podkreślić, że przedstawione pytania do pracy, mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i nie umniejszają jej wartości merytorycznej, którą uważam za ciekawą z punktu widzenia naukowego i poznawczego. Zaś sama praca jest osadzona w realnym problemie gospodarczym. Zrealizowany w dysertacji problem badawczy i jego zakres merytoryczny jest bardzo szeroki, od aspektów teoretycznych i badań symulacyjnych, po opracowanie i wykonanie filtrów a także badania weryfikacyjne emisji substancji szkodliwych zawartych w spalinach, pozwalających na określenie skuteczności tych filtrów w układzie wydechowym. Co warte podkreślenia Doktorant wykonywał badanie w układzie porównawczym zatem wszystkie badania wykonywał dwukrotnie, co wpływa na czasochłonność zrealizowanej pracy. W literaturze tematu brak jest stosownych wyników badań, mogących stanowić odniesienie do rozpatrywanej tematyki. Ilość czynników wpływających na emisję substancji szkodliwych jest znaczna, co bardzo komplikuje zagadnienie, a zwłaszcza jego interpretację w zakresie emisji bezwzględnej, a pomiary muszą być wykonywane w jednych seriach pomiarowych. Tematyka rozprawy jest otwarta, co czyni ją jeszcze bardziej ciekawą i aktualną, to też motywuje Doktoranta do prowadzenia dalszych badań, a przedmiotowa praca stanowi punkt wyjściowy do opracowania w pełni skutecznego sposobu oczyszczania spalin metodą retrofittingu.

Podsumowując Doktorant udowodnił, że posiada:

- umiejętność analizy tematu i doboru odpowiedniej literatury technicznej,
- dużą wiedzę z zakresu identyfikacji obiektu i prowadzenia pracochłonnych badań,
- wiedzę z zakresu planowania, metodyki pomiaru, zestawienia stanowiska pomiarowego i prowadzenia badań eksperymentalnych,
- umiejętność w zakresie prowadzenia badań symulacyjnych,
- umiejętność wyciągania syntetycznych wniosków z badań weryfikacyjnych i ich rekomendacje na przyszłość.

Umiejętności te doprowadziły do osiągnięcia założonego celu pracy rozprawy.

Doktorant mgr inż. Maciej Siedlecki udowodnił, że potrafi określić problem badawczy, który rozwiązał samodzielnie, przez co przyczynił się do rozwoju dyscypliny inżynieria lądowa i transport. Uważam za uzasadniony wniosek o dopuszczenie Autora rozprawy do jej publicznej obrony.

Po przeczytaniu rozprawy chciałbym dodatkowo podkreślić, że prace eksperymentalne mają bardzo istotne znaczenie dla rozwoju nauk technicznych, co nie zawsze znajduje uznanie w recenzjach. Porusza ona szerokie spektrum wiedzy objętej tematem rozprawy, począwszy od analizy zjawiska emisyjnego i jego charakterystyki, badań symulacyjnych, przygotowania stanowiska badawczego, zestawienia aparatury badawczej, przeprowadzenia badań weryfikacyjnych i ocenę wyników badań oraz ich dyskusję. W tym kontekście praca jest kompletna, wykraczająca poza zakres zwykle realizowanych prac doktorskich. Doktorant osiągnął założony cel rozprawy i jasno nakreślił plan dalszych prac naukowych. Świadczy to o Jego dojrzałości naukowo-badawczej. Zaś sama tematyka rozprawy jest ważna i aktualna, a jej wyniki mogą być wykorzystane w gospodarce do zmniejszenia emisji substancji szkodliwych zawartych w spalinach silników.

Dlatego stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra inż ***Macieja Siedleckiego*** pt. „***Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach***" przez Radę Dyscypliny **Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej.**

4. Wniosek końcowy

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. ***Macieja Siedleckiego*** pt. „***Emisja cząstek stałych z silników pojazdów pozadrogowych z użyciem retrofittingu w rzeczywistych warunkach***" spełnienia warunki określone ustawą „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 z późniejszymi zmianami (Dz. U. z 2016 r. poz. 882) **i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej** w dyscyplinie: Inżynieria Lądowa i Transport.