Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Instytut Silników Spalinowych i Napędów
Politechniki Poznańskiej

Poznań, 20.09.2022

O C E N A
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Kurzydyma

pt.: „Experimental and numerical research of the selective catalytic reduction system for diesel engine cars" („Badania eksperymentalne i numeryczne selektywnej redukcji katalitycznej dla samochodów z silnikiem o zapłonie samoczynnym")

podstawa opracowania: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny „Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka" Politechniki Śląskiej RIE-BD.512.37.2022 z dnia 03.08.2022, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej wraz z umową.

1. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU ROZPRAWY

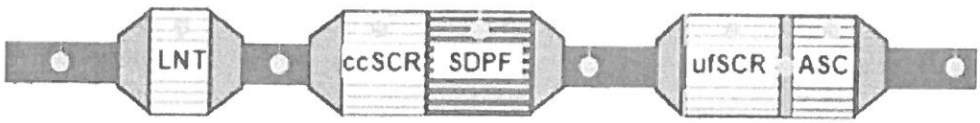
Motoryzacyjne skażenie środowiska naturalnego jest częścią globalnej problematyki ekologicznej i już od dawna jest przedmiotem wielu działań współczesnego człowieka. Od 50 lat odnotowuje się jednak wyraźne działania legislacyjne, głównie w zakresie ograniczania emisji związków szkodliwych spalin z silników. Odpowiednie i coraz bardziej restrykcyjne przepisy prawne wymuszają zastosowanie coraz bardziej złożonych i kosztownych rozwiązań technologicznych. Powyższe działania są jednak uzasadnione, tym bardziej, iż cały czas obserwuje się ciągły wzrost liczby użytkowanych samochodów. Prognozy ekonomiczne wskazują, że nadal będą zwiększać się wskaźniki mobilności społeczeństw w gospodarce światowej, której wynikiem będzie wzrost zapotrzebowania na transport (również transport miejski). Wynikiem tych procesów będzie aktywne oddziaływanie państw w kierunku dalszego ograniczania emisji związków szkodliwych do atmosfery i zmniejszania zużycia paliwa przez źródła napędu pojazdów. Największy problem upatruje się nadal w zakresie emisji tlenków azotu (NO_x) i emisji cząstek stałych (PM), zarówno w odniesieniu do ich udziału masowego jak i liczby tychże cząstek w spalinach. Należy mieć również na uwadze nielimitowane składniki emisji, których znaczenie (z uwagi na konieczność ich ograniczenia) zwiększa się w miarę przyrostu wskaźników motoryzacji i rozwoju metod oraz systemów pomiarowych.

Wbrew popularnym opiniom silnik spalinowy jeszcze przez wiele lat będzie podstawowym źródłem napędu środków transportu. Według najnowszych prognoz, prawie 90% pojazdów osobowych w Europie będzie zelektryfikowanych (hybrydy) w 2030 roku, jednak w ponad 70% z nich będą nadal silniki spalinowe. Wskutek coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin (Euro 7; FIT FOR 55), które muszą sprostać „idei" tzw. *Zero-Impact Combustion Engines*, konieczne są wszelkie modyfikacje silników spalinowych, pozwalające na spełnienie powyższych wymagań w obszarze emisji związków szkodliwych spalin.

Z kolei dla silników dedykowanych dla pojazdów typu HDV (*Heavy Duty Vehicles*) w 2050 roku emisja CO_2 ma wynosić zero (Dyrektywa EU 1242/2019), co praktycznie eliminuje tłokowe silniki spalinowe zasilane paliwami węglowodorowymi. Dlatego obecnie wiele firm (Toyota, Yamaha, AVL, FEV, BMW, Keyou, Deutz, Cummins, MAN, Liebherr itd.) pracuje nad zastosowaniem silników zasilanych wodorem o emisji CO_2 zero i emisji jedynie tlenków azotu NO_x. Rozwiązanie powyższe jest perspektywiczne zarówno dla pojazdów typu HDV jak i LDV.

Wprowadzenie normy emisji Euro 7 stanowi wyzwanie dla producentów pojazdów. Dotyczy ona ograniczenia o co najmniej 50% emisji składników szkodliwych i toksycznych spalin, w tym emisji CO_2 (zużycia paliwa), co zmusza producentów do zastąpienia klasycznych silników spalinowych układami hybrydowymi. Obecnie na rynku silników spalinowych nie ma pewnej technologii pozwalającej na zmniejszenie emisji związków szkodliwych spalin samochodu, tak aby spełniała ona proponowane przez ustawodawcę limity Euro 7.

Przewiduje się zastosowanie systemu oczyszczania spalin (rys. 1) w pojazdach typu PC (*Passenger Cars* – samochody osobowe) z silnikami o zapłonie samoczynnym, umożliwiającego spełnienie wymagań normy Euro 7. Powyższe rozwiązanie składa się z 5 elementów, w tym aż 3 reaktorów katalitycznych typu SCR – *Selective Catalytic Reduction* (gdzie: LNT – reaktor zasobnikowy NO_x, ccSCR – SCR blisko wylotu spalin, ufSCR – SCR pod podłogą, SDPF – SCR naniesiony na DPF i ASC – reaktor amoniaku). Ponadto przewiduje się zastosowanie systemów oczyszczania spalin umożliwiających spełnienie poziomów norm Euro 7 w samochodach osobowych z silnikami o zapłonie iskrowym (wyposażone w reaktor katalityczny typu SCR).



Rys. 1. Schemat pozasilnikowego systemu oczyszczania spalin dla pojazdów typu PC z silnikami o zapłonie samoczynnym spełniających normy emisji Euro 7

Biorąc pod uwagę współczesny stan wiedzy na temat podjętego zagadnienia uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Kurzydyma stanowi oryginalne osiągnięcie Autora i wnosi ważne aspekty do badań nad systemem selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) dla samochodów z silnikami o zapłonie samoczynnym.

Badanie systemów oczyszczania spalin, zwłaszcza SCR, jest istotne ze względu na szkodliwość składników toksycznych spalin, szczególnie tlenków azotu, dla zdrowia ludzi i środowiska naturalnego. Waga powyższej problematyki została dostrzeżona przez społeczeństwa na całym świecie, efektem czego jest określona świadomość jej skutków i oddziaływanie na podmioty gospodarcze i społeczne, aby zmniejszyć to szkodliwe oddziaływanie. W wyniku tego, zagadnienia w tym obszarze naukowym stały się jednymi z najistotniejszych obszarów badań również tych ośrodków naukowych i badawczych oraz przemysłowych, które posiadają najwyższy potencjał intelektualny i ekonomiczny. Duża liczba publikacji ukazujących się na całym świecie wskazuje na ogromną konkurencję w tym zakresie. Nie ulega zatem wątpliwości, iż tematyka ocenianej rozprawy, jej cele i zakres są wybrane trafnie i to zarówno ze względu na aspekt naukowy jak i utylitarny.

Postawiony problem i zadania naukowe we właściwy sposób spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka dysertacji jest aktualna i zgodna z kierunkami badań silników tłokowych o zapłonie samoczynnym, a także może być przydatna dla silników o zapłonie iskrowym lub zasilanych paliwem wodorowym.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 237 stron maszynopisu. Pracę podzielono na 13 merytorycznych rozdziałów. Treść pracy obejmuje również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz zastosowanych skrótów i symboli, wykaz literatury, spis rysunków i tabel oraz 6 załączników. W pracy zamieszczono 153 materiały graficzne i 48 tabel. Bibliografię stanowi 146 pozycji o charakterze naukowym i poznawczym, obejmujących tematykę badawczą rozprawy. Uwzględniono w nich artykuły naukowe w języku polskim i angielskim. Na uwagę zasługuje cytowanie przez Autora wielu relatywnie nowych, głównie anglojęzycznych prac naukowych. Potwierdza to aktualność podjętej problematyki i świadczy o rzetelnym przeglądzie literatury dokonanym przez Doktoranta.

Celem poznawczym pracy było przeprowadzenie badań eksperymentalnych i numerycznych dla układu selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) samochodu osobowego z silnikiem o zapłonie samoczynnym. Badania polegały na porównaniu wyników dla dwóch różnych układów SCR, istniejącego i nowoopracowanego. Zaprojektowany układ SCR jest dedykowany do wdrożenia na rynek wtórny, co również wiązało się z opracowaniem własnej konstrukcji jego miksera.

Ze względu na coraz bardzie restrykcyjne normy emisji, w szczególności tlenków azotu (NO_x), układy SCR były opracowane i instalowane w samochodach z silnikiem o zapłonie samoczynnym na całym świecie. Systemy te muszą być sprawdzane podczas badań emisji (na hamowani podwoziowej jak i w rzeczywistych warunkach eksploatacji – testy RDE – *Real Driving Emissions*) pod kątem redukcji NO_x do odpowiedniego limitu, w celu dopuszczenia samochodu do ruchu drogowego. Aby osiągnąć ten cel, zastosowano podejście, w którym przeprowadzono zarówno szerokie badania eksperymentalne, jak i zaawansowane metody numeryczne oparte na obliczeniowej mechanice płynów (CFD).

W związku z tym, w pracy Autora zbadano różne warianty konstrukcyjne układu SCR i mikserów dla różnych parametrów operacyjnych. Przebadano kilka rozwiązań w różnych warunkach, które odzwierciedlają rzeczywiste warunki pracy silnika o zapłonie samoczynnym. W laboratoriach Tenneco przetestowano i analizowano między innymi spadki ciśnienia na monolitach, dystrybucję gazu i konwersję tlenków azotu. Ponadto, w celu opracowania modelu numerycznego, wykorzystano skanowanie laserowe do odtworzenia modeli 3D z rzeczywistych geometrii układu przy użyciu inżynierii odwrotnej.

Oprogramowanie ANSYS Fluent zostało wykorzystane do przeprowadzenia wielofazowych badań numerycznych w obszarze mechaniki płynów. Dokonano analizy kolejnych procesów zachodzących w układzie, tj. odparowania i mieszania reagentów przed reaktorem katalitycznym, właściwej dystrybucji przepływu przez ten reaktor i doboru odpowiednich warunków termicznych procesu. Uwagę skupiono również na poprawnej implementacji kinetyki reakcji w układzie SCR. Model CFD został zweryfikowany w oparciu o dane eksperymentalne, które pokazały dobrą korelację między parametrami mierzonymi a tymi uzyskanymi z procesu symulacji numerycznej.

Ostateczną konstrukcję zamiennego układu SCR porównano z oryginalnym układem dostarczonym przez producenta wyposażenia. Stwierdzono, że zastosowanie nowego miksera w układzie zamiennym SCR prowadzi do nieco niższej emisji NO_x, co zostało potwierdzone w jednostce certyfikującej przez badanie emisji w samochodzie na hamowni podwoziowej w warunkach testu NEDC.

3. OCENA ROZPRAWY

Uwagi ogólne

Rozprawę oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym i metodycznym. Praca zawiera pojedyncze błędy i niedociągnięcia, które nie rzutują na jej ogólną wysoką ocenę. Układ rozprawy jest logiczny i odpowiada tokowi wykonanych badań oraz analiz. W pracy prawidłowo przedstawiono ciąg czynności badawczych w sposób charakterystyczny dla rozpraw doktorskich. Podział treści rozprawy i kolejność rozdziałów są przejrzyste i nie budzą większych zastrzeżeń. Praca nie zawiera powtórzeń i błędów logicznych. Rozprawa została napisana wyjątkowo starannie z wykorzystaniem poprawnego języka technicznego. Pojęcia i terminologia są właściwie użyte w dysertacji. Przedstawione w pracy rysunki i tabele zostały opracowane bardzo dokładnie z dbałością o czytelność zamieszczonego w nich tekstu. Materiały ilustracyjne w części teoretycznej dobrze uzupełniają opisane treści. Na uwagę zasługuje precyzyjne sformułowanie celów badawczych i zakresu pracy. Doktorant wykonał eksperymenty i analizy o dużej wartości naukowej i aplikacyjnej.

Wśród zalet pracy należy wymienić:

- Przeprowadzenie przeglądu literaturowego stanu rozwoju systemów SCR i modelowania komputerowego oraz ich poszczególnych elementów.
- Zaprojektowanie i wykonanie pierwszego zamiennego układu SCR na rynek części zamiennych (pod marką WALKER).
- Zaproponowany układ SCR może być także elementem systemu poprawiającego parametry ekologiczne pojazdów starszej generacji (tzw. *retrofitting*).
- Zaprojektowanie i wykonanie trzech prototypowych mieszalników oraz finalnej ulepszonej nowej, oryginalnej konstrukcji mieszalnika do zamiennego układu SCR.
- Zastosowanie w zamiennym układzie SCR tańszych w produkcji reaktorów katalitycznych z warstwą aktywną wanadu.
- Przeprowadzono badania eksperymentalne na dedykowanych stanowiskach laboratoryjnych dla różnych wariantów konstrukcyjnych układu SCR (prototypy vs. oryginał) i mieszalników (prototypy vs oryginał), przy różnych parametrach operacyjnych odpowiadających rzeczywistym warunkom pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Zbadano spadki ciśnienia w obrębie monolitów, rozkład przepływu gazu i konwersję tlenków azotu.
- W celu opracowania modelu numerycznego, wykorzystano skanowanie laserowe do odtworzenia modeli 3D z rzeczywistej geometrii układu SCR przy zastosowaniu inżynierii odwrotnej.
- Opracowano model numeryczny CFD kompletnego układu SCR, który właściwie przewiduje zjawiska fizykochemiczne a tym samym stopień konwersji NO_x w różnych warunkach pracy silnika. Do zbudowania modelu i przeprowadzenia wielofazowych badań CFD wykorzystano oprogramowanie ANSYS Fluent. Model numeryczny po raz pierwszy ujmuje wszystkie procesy zachodzące w układzie SCR, tj. wtrysk wodnego roztworu mocznika (AdBlue) do spalin, jego odparowanie i mieszanie reagentów, pirolizę i hydrolizę mocznika do amoniaku, właściwy rozkład przepływu przez reaktor katalityczny oraz reakcje zachodzące w obrębie reaktora. Skupiono również uwagę na doborze odpowiednich warunków termicznych procesu i na poprawnej implementacji kinetyki reakcji w układzie SCR.
- Przeprowadzono walidację modelu komputerowego. Model CFD kompletnego układu SCR zweryfikowano w oparciu o dane empiryczne, które potwierdziły dobrą korelację

między parametrami symulowanymi a mierzonymi. Potwierdzono, iż zastosowane modele i procesy zachodzące w układzie oraz techniki rozwiązań są odpowiednie.

- Uzyskanie homologacji dla opracowanego nowego zamiennego układu SCR wraz z mieszalnikiem. Przeprowadzono badania emisji wg obowiązujących europejskich przepisów homologacyjnych w laboratorium certyfikacyjnym. W ramach tych badań ostateczną konstrukcję zamiennego układu SCR porównano dodatkowo z oryginalnym układem dostarczonym przez producenta. Stwierdzono, że zastosowanie nowego mieszalnika w układzie zamiennym SCR prowadzi nawet do mniejszej emisji NO_x. Uzyskanie homologacji umożliwia uruchomienie produkcji i sprzedaż opracowanego układu SCR, jako części zamiennej na rynku wtórnym pod marką WALKER. Sugerowałbym dodatkowe przebadanie, oprócz testu NEDC, tego prototypowego rozwiązania w teście WLTC, który charakteryzuje się bardziej dynamicznymi warunkami pracy silnika i jest bardziej zbliżony do testu RDE.

O wysokiej wartości merytorycznej pracy świadczą również:

- właściwe uzasadnienie podjętej tematyki poprzedzone szeroką analizą stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie celu i zakresu pracy,
- oryginalność uzyskanych wyników badań,
- wykorzystanie zaawansowanej analizy matematycznej do przetwarzania zarejestrowanych danych,
- logiczna i przejrzysta struktura pracy.

W trakcie realizacji rozprawy Doktorant wykazał się dobrym przygotowaniem do pracy naukowej, w szczególności znajomością zagadnień teoretycznych poświęconych silnikom spalinowym, umiejętnością wykorzystania współczesnych metod pomiarowych w badaniach silnikowych i umiejętnością zaawansowanej matematycznej analizy danych.

Uwagi krytyczne

Pomimo bardzo wysokiej oceny merytorycznej rozprawy doktorskiej pojawiają się drobne uwagi krytyczne i wątpliwości (niektóre o charakterze dyskusyjnym), wśród których wymienić należy to, iż:

- W pracy zabrakło rozpatrzenia ważnego zagadnienia, jakim jest praca systemu SCR (zwłaszcza w badaniach laboratoryjnych) w warunkach dynamicznych, gdyż są one obecnie kluczowe w aspekcie emisji szkodliwych składników spalin.
- Do badań wykonywanych w pracy nie zastosowano teorii planowania doświadczeń. Planowanie doświadczeń umożliwia optymalizowanie prac empirycznych, co pozwoliłoby zmniejszyć Autorowi nadmierny wkład pracy. Dodatkowo, programy do planowania badań umożliwiają skuteczną analizę statystyczną uzyskanych wyników.
- Praca nie zawiera analizy błędów; nawet sama informacja na temat dokładności użytej aparatury nie daje przecież pełnego poglądu na dokładność pomiarów. Dzięki temu możliwe byłoby określenie wartości uzyskanych analiz i zależności funkcyjnych w kontekście istotności statystycznej oraz wartości informacyjnej sygnałów pomiarowych.
- W dziale badań numerycznych, zbyt obszernie i szczegółowo opisano etapy przygotowania modelu numerycznego do symulacji CFD. Czytelnik może mieć wrażenie, iż ma przed sobą instrukcję a nie rozprawę.
- W badaniach eksperymentalnych jak również w symulacjach CFD, nie uwzględniono izolacji termicznej w prototypowym układzie SCR, która ma niewątpliwie wpływ na tworzenie się amoniaku, końcową redukcję NO_x i tworzenie się niechcianych osadów.
- W badaniach laboratoryjnych, podczas sprawdzania skuteczności redukcji NO_x w układzie SCR pominięto filtr cząstek stałych (DPF), który jest w jednej obudowie z reaktorem

katalitycznym utleniającym (DOC). Kombinacja tych dwóch układów z pewnością przyczyniłaby się do uzyskania lepszych wyników końcowych.

- Zamienny układ SCR z mieszalnikiem „C" przeszedł pozytywnie testy emisji, jednakże badania eksperymentalne pokazały, iż emisja NH_3 była na wysokim poziomie.
- Brak badań laboratoryjnych w niskim zakresie temperatur i sprawdzenie tworzenia się depozytu w układzie SCR. Nie przeprowadzono również symulacji numerycznych w stanach nieustalonych i z włączonym modelem do śledzenia zjawiska „*wall-film*", w którym można przewidzieć miejsce tworzenia się depozytu.
- Modele 3D układów SCR zostały uproszczone w pewnym stopniu, co również ma wpływ na wyniki końcowe.
- Dane do wtrysku AdBlue w modelu numerycznym DPM zaczerpnięto z literatury, jednakże w pracy nie wykonano walidacji z eksperymentem, bądź też walidacji poprawności implementacji danych do symulacji CFD.
- W modelu numerycznym, oprócz podstawowej reakcji SCR i rozkładu roztworu mocznika, nie uwzględniono również pozostałych reakcji SCR.
- W symulacji dla modelu 2D, dokonano walidacji kinetyki reaktora wanadowego, którego dane kinetyczne opracowano na podstawie katalizatora przemysłowego SCR. Wątpliwe jest, czy działanie takiego katalizatora jest porównywalne z katalizatorem SCR stosowanym w samochodzie osobowym.
- W symulacjach 3D, podobnie dane kinetyczne zaczerpnięto z literatury, jednakże dla katalizatora SCR typu V2O5/W-TiO2, natomiast fizycznie w prototypach zastosowano katalizatory SCR typu V2O5/SiO2-TiO2.
- W symulacjach porównawczych dla układu oryginalnego SCR, zastosowano tę samą kinetykę reakcji jak w części zamiennej w oparciu o katalizatory wanadowe. Natomiast wiadomo było, iż część oryginalna posiadała reaktory typu Cu-Zeolit.

Pozostałe uwagi ogólne:

1. Znaczna objętość dysertacji, wynikająca m.in. z „podręcznikowego" charakteru niektórych rozdziałów. Pracę doktorską rozbudowano niepotrzebnie o rys historyczny, testy emisyjne i obowiązujące europejskie regulacje. W załącznikach opisano niepotrzebnie układy oczyszczania spalin.
2. Mimo starannego zredagowania rozdziału „13. Summary and conclsions" sugerowałbym bardziej przejrzyste zakończenie pracy przez dodanie syntetycznych wniosków w następującej konfiguracji:
   - ogólne (czy zrealizowano cele pracy i czy udowodniono tezy),
   - szczegółowe,
   - metodyczne,
   - utylitarne,
   - perspektywiczne (kierunki dalszych badań).
3. W pracy występuje tzw. „tekst wiszący", poniżej wyjaśnienie ogólne problemu:
   - przy numeracji cyfrowej wielorzędowej po tytule rozdziału 1 powinien od razu następować tytuł podrozdziału 1.1, a tuż po tytule podrozdziału 1.6 powinien być tytuł podrozdziału 1.6.1 itd.; między nimi nie powinno być żadnego tekstu,
   - teksty te to z reguły ogólne wprowadzenia do rozdziałów, omówienia czy streszczenia,
   - jeżeli tekst wiszący jest cennym i niezbędnym wprowadzeniem do tematu – powinien mieć numer i tytuł,
   - jeśli tekst ten zawiera same ogólniki lub omówienie dalszej części rozdziału – powinien zostać usunięty przez Autora,
   - **w pracy Autora występuje taki tekst: 4 → 4.1; 7 → 7.1; 7.1 → 7.1.1; 9 → 9.1; 9.1 → 9.1.1; 9.2 → 9.2.1; 10 → 10.1; 10.2 → 10.2.1; 10.3 → 10.3.1; 10.4 → 10.4.1; 10.5**

→ 10.5.1; 11 → 11.1. 12 → 12.1.

4. W podrozdziale 9.1 nie może występować tylko jeden podrozdział niższego stopnia 9.1.1.
5. W tabelach 15, 21, 22 i 23 zapis ułamków dziesiętnych jest niepoprawny – zastosowano mieszany zapis, raz angielski (0.5) a kiedy indziej polski (0,5).

Podsumowanie oceny merytorycznej

Pomimo wymienionych powyżej drobnych uwag krytycznych i sugestii, bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy doktorskiej. Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres wykonanej pracy, trafność podjętej tematyki badawczej i duży wkład intelektualny Autora. Wymienione uwagi krytyczne nie umniejszają mojej wysokiej oceny recenzowanej dysertacji. Przedstawiona rozprawa zawiera ważne treści poznawcze i praktyczne. Badania przedstawione w pracy zwróciły uwagę na duże znaczenie systemu podawania płynu redukującego NO_x do reaktora typu SCR.

Uważam, że opracowany przez Autora materiał literaturowy i badawczy zostały użyte we właściwy sposób. Uzyskane przez Doktoranta wyniki i przedstawione analizy świadczą o rzetelności oraz wnikliwości badawczej Autora. Rozprawa doktorska przedstawiona do oceny może zostać uznana za oryginalne dzieło wnoszące duży wkład i mające duże znaczenie dla rozwoju nowych konstrukcji systemów oczyszczania spalin.

Autor podjął się trudnej problematyki naukowej i wykorzystał złożoną metodologię badawczą. Przedstawione w pracy zagadnienia nie wyczerpują wszystkich zagadnień związanych z analizą procesu oczyszczania spalin w układach SCR dla silników o zapłonie samoczynnym. Podkreślić należy, że zarówno charakter procesu wtrysku czynnika redukującego jak również przebieg procesu roboczego w tego rodzaju reaktorze katalitycznym zależą zarówno od szeregu czynników fizykochemicznych jaki i szeregu innych parametrów związanych z pracą silnika. Liczba czynników wpływających na te zjawiska jest znaczna, a otrzymywane dane wejściowe są obarczone wieloma błędami, co bardzo komplikuje zagadnienie. Trudne jest zdecydowane wydzielenie wpływu jednego czynnika (tzw. analiza pierwiastkowa), ponieważ należy liczyć się z interakcją innych. Obecny stan wiedzy nie pozwala na pełną ocenę wpływu tych czynników i parametrów na proces redukcji tlenków azotu, zwłaszcza w stanach dynamicznych. Wskazuje to na konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w pełni osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, bowiem uzasadniono twierdzenia Autora ujęte w tezach pracy, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych oraz mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w niektórych elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.
- biorąc powyższe pod uwagę proponuję uzupełnić metodykę badań i w przyszłości ujęcie całości wiedzy związanej z opracowaniem i technologią wytwarzania systemów SCR przedstawić w jednej pozycji książkowej.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych i wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną oraz umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka", w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Damiana Kurzydyma pt.: „Badania eksperymentalne i numeryczne selektywnej redukcji katalitycznej dla samochodów z silnikiem o zapłonie samoczynnym" (promotor: dr hab. inż. Zbigniew Żmudka, prof. PŚ) spełnia wymagania określone dla tego typu prac zgodnie z Ustawą z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r., nr 65, poz. 595, z późn. zm.) w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2020.1086 z późn. zm.), a Autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

Podpisał Jerzy Merkisz