Wrocław, 07.10.2022 r.

Dr hab. inż. Norbert Modliński, profesor uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczno-Energetyczny
Katedra Inżynierii Konwersji Energii
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
norbert.modlinski@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Damiana Kurzydyma zatytułowanej **"Experimental and numerical research of the selective catalytic reduction system for diesel engine cars"** wykonanej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej pod opieką promotora dr hab. inż. Zbigniewa Żmudki, Profesora Politechniki Śląskiej.

1. Podstawa opracowania

Poniższa recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Rusina - zgodnie z pismem nr RIE-BD.512.37.2022.

2. Znaczenie problematyki podjętej w rozprawie

Rozprawa poświęcona jest problematyce redukcji emisji NO_x z silników diesla stosowanych w samochodach osobowych w oparciu o technologię selektywnej redukcji katalitycznej (SCR). Tlenki azotu NO_x mogą powodować choroby układu oddechowego i serca. Jak podaje Parlament Europejski Transport drogowy odpowiada za emisję 40% NO_x w Europie. Ok. 80% tych emisji pochodzi z samochodów z silnikiem diesla (w silnik taki wyposażony jest niemal co drugi nowy samochód sprzedawany w UE). Dopiero w 2017 Unia Europejska zaktualizowała procedury mierzenia emisji w taki sposób, by lepiej odpowiadały realnym warunkom prowadzenia pojazdów. W ostatnich latach szczególnie w Europie obserwuje się spadek popularności Diesli w autach osobowych szczególnie z przyczyn ekonomicznych oraz rozwojem napędów hybrydowych i elektrycznych. W określonych segmentach natomiast (SUV, auta klasy średniej, dostawcze) koniec ery silników wysokoprężnych jest daleką perspektywą. Opracowanie nowego układu SCR dedykowanego do wdrożenia na rynku

wtórnym wydaje się być atrakcyjnym i jego potencjał należało zweryfikować w dalszych badaniach zarówno eksperymentalnych jak i numerycznych.

3. Zakres rozprawy

Praca doktorska Damiana Kurzydyma spisana jest w języku angielskim. Zawiera łącznie 237 stron, na które składa się 13 ponumerowanych kolejno rozdziałów, które stanowią główna część pracy, wstęp, spis oznaczeń, rysunków i tabel, streszczenie w języku polskim, bibliografię złożoną z 146 pozycji literaturowych. Jako uzupełnienie głównej części rozprawy zawarto 6 załączników dodatkowo opisujących zagadnienia związane tematem pracy oraz wykaz publikacji naukowych.

W rozdziale 1 autor przybliża zagadnienia emisji najważniejszych zanieczyszczeń związanych z pracą silników wewnętrznego spalania na tle innych źródeł w oparciu o dostępne opracowania.

W rozdziale 2 autor zwięźle opisuje uzasadnienie podjęcia tematu w oparciu o wiedzę rynkową, wskazującą na potencjalną niszę w dostępności systemów SCR dedykowanych do samochodów osobowych oraz możliwość ich udoskonalenia.

W rozdziale 3 autor przedstawia następujące cele badań:

- zdobycie aktualnej wiedzy na temat układu SCR i jego modelowania,
- badania eksperymentalne dla różnych konstrukcji układów SCR z uwzględnieniem testów emisji w certyfikowanej jednostce badawczej
- opracowanie kompletnego modelu numerycznego CFD, który jest zdolny do prognozowania wydajności układu SCR w różnych warunkach pracy,
- walidacja modelu numerycznego z danymi eksperymentalnymi,

Rozdział 4 omawia podstawowe procesy chemiczne odpowiedzialne za formowanie się NOx w silnikach wewnętrznego spalania oraz obecne technologie pozwalające na ich redukcje takie jak recyrkulacja spalin, pochłaniacz NOx z mieszanki ubogiej, selektywnej katalitycznej redukcji SCR, katalizator poślizgu amoniaku czy też połączenia filtra cząstek stałych z katalizatorem SCR.

Rozdział 5 poświęcony jest ewolucji standardów emisyjnych w Unii Europejskiej, w szczególności norm Euro 1-6.

Rozdział 6 omawia zmiany procedury testów służących do pomiarów poziomu emisji NOx, które są obok limitów tych substancji, ustanowione przez przepisy UE. Unia Europejska aktualizuje procedury mierzenia emisji w taki sposób, by lepiej odpowiadały realnym warunkom prowadzenia pojazdów.

W rozdziale 7 autor szczegółowo przedstawia aktualny stan technologii katalizatorów SCR z naciskiem na proces produkcji, budowę, parametry pracy, wydajność w odniesieniu do najpopularniejszych kompozycji. W tym rozdziale omówione jest również zagadnienie trwałości katalizatorów w kontekście starzenia się, zatrucia i powstawania osadu. W tym rozdziale scharakteryzowano przykłady oraz proces projektowanie i rozwój mikserów SCR,

które mają za zadanie jak najlepsze wymieszanie reagenta ze spalin powodując jednocześnie niski spadek ciśnienia.

Rozdział 8 omawia metodologię oraz plan badań. Autor w pierwszej kolejności realizuje badania eksperymentalne układu SCR na potrzeby dalszej walidacji symulacji CFD. Układ został przebadany dla trzech zaproponowanych prototypowych mikserów, które porównano z mikserami aktualnie dostępnymi na rynku. Badania pomiarowe podzielono na 7 logicznych przypadków stanowiących komplementarną całość. Dwa kompletne prototypy układu przygotowano do badań emisji w certyfikowanej jednostce. Dla wszystkich wariantów przygotowano 3-D modele CFD.

Rozdział 9 omawia testy eksperymentalne prototypów. Badano spadek ciśnienia w katalizatorach SCR (od wlotu do punktu pomiędzy boksami) dla różnych wariantów na potrzeby określenia parametrów wejściowych do modelu ciała porowatego w obliczeniach CFD oraz w celu wykazania, że spadek ciśnienia części zamiennej jest zgodny z dyrektywą. Na innym stanowisku badawczym zbadano pole prędkości w przekroju wlotowym monolitu. Pozwalało to na monitorowanie jednorodności przepływu dla różnych konstrukcji miksera. Stanowisko badawcze było wyposażone w urządzenia odwzorowujące parametry operacyjnego silnika w czasie rzeczywistym. Urządzenia pomiarowe pozwalały na określenie skuteczności redukcji NOX oraz prześlizgu amoniaku. Również dla tych składników przedstawiono jednorodność rozkładu w przekroju poprzecznym przepływu. Finalnie zbadano skład chemiczny katalizatora SCR.

Rozdział 10 poświęcony jest przede wszystkim modelowaniu przepływu reaktywnego w oparciu o technikę CFD. Omawiana jest budowa obszaru obliczeń, wybór modeli turbulencji, reagowania w fazie gazowej oraz przepływu z reakcjami chemicznymi w ciele porowatym, przepływu dwufazowego, a także warunki brzegowe z uwzględnieniem charakterystyki wtrysku reagenta. W rozdziale 10 analizowana jest również kinetyka katalitycznego usuwania NO. Autor wykorzystuje dostępne dane literaturowe do określenia parametrów kinetycznych reagowania w modelu ciała porowatego zgodnie z modelem Arrheniusa. Na potrzeby dalszych porównań autor przytacza rozwiązanie analityczne ubytku NO w czasie.

Rozdział 11 omawia walidację oraz weryfikację przyjętych założeń numerycznych. W pierwszej fazie obliczeń przyjęte założenia modelowe zweryfikowano w uproszczonym modelu 2-D w oparciu o rozwiązanie analityczne. Następnie przeprowadzono symulacje 3-D na modelu szczegółowym. Porównanie spadków obliczonych ciśnienia na katalizatorze z pomiarami potwierdza prawidłowość wyznaczonych danych wejściowych do modelu CFD. Porównano również pola prędkości oraz koncentracji NO w przekrojach poprzecznych a także wartości konwersji NO. Badania numeryczne pozwalają również określić wpływ mikserów na redukcję NO i stopień wymieszania tlenku azotu oraz maksymalny prześlizg amoniaku.

W rozdziale 12 przedstawione są wyniki testów emisji w certyfikowanym laboratorium. Testy wykazały, że wszystkie wymagania regulacyjne zostały spełnione, dzięki temu zamienny układ SCR miał prawo do nadania mu homologacji.

Rozprawa napisane bardzo starannie, poprawnym językiem. Można doszukać się drobnych usterek językowych. Nie rzutują one na czytelność i układ logiczny pracy Pod względem redakcyjnym pracę oceniam wysoko. Układ pracy jest czytelny i logiczny. Zwrócono uwagę na

jasność wypowiedzi, czytelność, poprawne użycie języka technicznego. Ponadto praca jest bardzo starannie opracowana graficznie.

Przedstawione cele pracy są zgodne z tematem rozprawy a wymieniony zakres wyczerpuje tematykę przedstawioną w tytule rozprawy. Lektura całości pracy pozwala na stwierdzenie, że główne cele zostały osiągnięte.

4. Wartość naukowa i merytoryczna

Praca dotyczy badań nad technologią selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) NO_x w zastosowaniu do samochodów osobowych z silnikami diesla. Nie jest to technologia nowa, jednakże autor wykazał potencjał do jej rozwoju i udoskonalenia. W tym kontekście zaproponowano oryginalny plan badawczo-rozwojowy oparty o prace eksperymentalne oraz badania numeryczne różnych wariantów konstrukcji. Mierzalnym i praktycznym efektem pracy jest przyznanie certyfikowanej homologacji zmodyfikowanego układu SCR.

Wykorzystywane techniki pomiarowe i symulacyjne nie noszą znamion szczególnie innowacyjnych naukowo. Należy natomiast zdecydowanie przyznać, że ich kompilacja, staranne przygotowanie planu badań wraz z inteligentnym wykorzystaniem symulacji CFD wnosi pierwiastek oryginalności. Pozwala uzyskać nowe spojrzenie na proces redukcji NO_x w układach SCR oraz zaproponować udoskonalenie konstrukcji.

Praca odnosi się do aktualnej literatury z danej tematyki badawczej.

Cała metodologia zarysowana w rozdziale 3 skłania mnie do konkluzji, że przedstawiona argumentacja w rozprawie zbudowana jest na właściwej podstawie teoretycznej, koncepcyjnej. Badania oraz cały proces intelektualny, o których mowa w rozprawie został dobrze zaprojektowany w oparciu o odpowiednie metody i narzędzia.

Rozprawa wyraźnie określa swoje implikacje dla praktycznego zastosowania wyników oraz wpływu na środowisko i społeczeństwo wyraźnie wypełniając lukę między teorią a praktyką. Wskazany jest również potencjał do dalszych badań. Autor precyzyjnie opisuje kolejne zagadnienia badawcze, które pozwolą na jeszcze dokładniejsze zrozumienie procesu SCR w samochodach osobowych z silnikiem diesla.

Zadanie badawcze podjęte przez autora wymagało szerokiej wiedzy z zakresu teorii procesów i zjawisk występujących podczas selektywnej katalitycznej redukcji NO_x (kinetyka chemiczna, mechanika płynów), modelowania numerycznego, technologii oraz warunków pracy układów SCR.

Należy również podkreślić dorobek publikacyjny, w skład którego wchodzą publikacje w renomowanym czasopiśmie Fuel (jedna publikacja w procesie recenzji). Świadczy to o wysokim poziomie przeprowadzonych badań co zostało pozytywnie ocenione przez recenzentów.

Temat należy uznać za trudny, aktualny, związany z wypełnieniem luki w dotychczasowych pracach badawczych. W związku z powyższym wybór poruszanej w rozprawie Pana mgr inż.

Damiana Kurzydyma problematyki badawczej uznaje za trafny oraz interesujący z naukowego i aplikacyjnego punktu widzenia.

5. Pytania problemowe i uwagi

W pracy nie znalazłam elementów, które budziłyby większe merytoryczne wątpliwości. Niemniej jednak chciałbym podnieść następujące kwestie:

1) Równania przedstawione w rozdziale 10.1 powinny być podzielone na te dotyczące ciała porowatego i wolnego przepływu.
2) W wolnym przepływie występuje przepływ turbulentny. Dlaczego do opisu reagowania fazy gazowej wykorzystano model „Finite Rate" opisujący przypadek dla przepływu laminarnego (równanie 65)?
3) Równanie 70 ma zastosowanie poniżej temperatury wrzenia. Powyżej tej temperatury ubytek masy zależy od utajonego ciepła parowania.
4) W oprogramowaniu Ansys Fluent każda z kropel UWS traktowana jest jako cząstka mocznika w formie ciała stałego oraz otaczająca ją woda (zawiesina). Po odparowaniu wody cząstka mocznika ulega sublimacji. Czy proces sublimacji opisuje równanie 73 czy przyjęto inne podejście?
5) W równaniu 73 najprawdopodobniej nie zgadzają się jednostki lub wymagają komentarza.
6) Rozwiązanie analityczne opisane równaniem 106 jest dalej w tekście niepoprawnie nazywane modelem 1-D.
7) Niektóre rysunki są oznaczanie mianem tabel (np. 15, 16).
8) Na rysunkach 107 i 108 legendy powinny mieć ten sam zakres, szczególnie dla prędkości są spore różnice (2.9 vs 1.9 m/s maksymalnej wartości).
9) Rozdział 12. Jak w testach certyfikujących regulowany był strumień reagenta? Czy był on stały czy zmieniał się z obciążeniem silnika, poziomem NO_x na wlocie?
10) Poziom doprowadzanego reagenta oraz prześlizg NH_3 powinien być zestawiony na rysunkach 124 – 128.
11) Rysunek 124. Dlaczego obserwujemy wzrost CO (znacząco), THC oraz CO2 w nowym układzie z niską zawartością warstwy aktywnej w porównaniu do systemu oryginalnego?

6. Wnioski końcowe

Oceniana rozprawa doktorska pana mgr inż. Damiana Kurzydyma mieści się w dyscyplinie naukowej: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka. Moja ocena merytoryczna pracy jest pozytywna.

W podsumowaniu opinii informuję, że przedstawione uwagi krytyczne nie podważają pozytywnej oceny całej rozprawy, a doktorant zrealizowała postawione sobie podstawowe cele, przedstawił oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dla założonego celu.

Stwierdzam zatem, że recenzowana rozprawa doktorska pana mgr inż. **Damiana Kurzydyma** pt. „**Experimental and numerical research of the selective catalytic reduction system for diesel engine cars**" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone Art. 13.1 Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, oraz przepisami wprowadzającymi Ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018, poz. 1669 z późn. zm.).

Stawiam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o przyjęcie przedłożonej rozprawy doktorskiej i dopuszczenie pana mgr inż. Damiana Kurzydyma do dalszego procedowania.

Podpisał Norbert Modliński