

Poznań, dnia 2.12.2019 r.

OCENA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Dzidy pt.:

Wpływ dezaktywacji reaktora selektywnej redukcji katalitycznej na konwersję szkodliwych związków spalin silnikowych

- 1. Podstawa formalna opinii:** pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Kra-kowskiej nr M.00-520-203/2019 z dnia 7.10.2019 roku, do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej.
- 2. Podstawa prawna:** Ustawa: Prawo o Szkolnictwie Wyższym z dnia 20 lipca 2018 r., (Dz. U. Poz. 1668), Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 1789 z 2017 r. *Stan prawny aktualny na dzień: 12.07.2019*), Roz-porządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 261 z dnia 19.01.2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.
- 3. Przedmiot opinii:** rozprawa doktorska mgr. inż. **Jakuba Dzidy** została wykonana w 2019 r., a jej promotorem jest dr hab. inż. Marek Brzeżański, prof. PK, zaś promotorem pomocniczym – dr inż. Piotr Bielaczyc, kierownik Działu Badań w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji Bosmal w Bielsku-Białej.
Przedłożona do zaopiniowania rozprawa zawiera 107 stron tekstu (bez interlinii), w tym 99 stron zasadniczego tekstu (podzielonego na 13 rozdziałów), spis treści, streszczenie w j. polskim i angielskim, wykaz oznaczeń i skrótów, podziękowania i 5,5 strony spisu li-teratury. W pracy umieszczono 53 rysunki, 13 tabel (w pracy nie zamieszczono osobnego wykazu rysunków i tabel) oraz 27 ponumerowanych wzorów. *Bibliografia* obejmuje 77 pozycji (w większości są to publikacje zagraniczne, głównie z okresu ostatnich kilkunastu lat).
- 4. Ogólna charakterystyka problematyki podjętej w rozprawie i ocena jej aktualności**

Mimo tego, że nad obniżeniem emisji związków toksycznych z silników spalinowych i po-jazdów samochodowych prace badawcze prowadzone są od wielu lat, to zaostrzające się przepisy emisyjne stale podtrzymują aktualność tej tematyki i tych problemów badawczych. Wprawdzie prace rozwojowe prowadzone nad systemami spalania, szczególnie w zakresie kontroli i sterowania procesem wywiązywania ciepła, oraz systemami katalitycznej redukcji emisji doprowadziły do osiągnięcia ich znacznej efektywności, jednak ciągle pojawiają się nowe problemy i wyzwania w tym zakresie.

W ostatnich kilkunastu latach szczególnie silnie forsowane są pracę nad zwiększaniem koncentracji mocy silników spalinowych (zwiększanie mocy z jednostki objętości skokowej), co w rzeczywistości sprowadza się do spalania większych porcji paliwa oraz zwiększaniu

temperatury doprowadzenia ciepła do obiegu silnikowego i skutkuje nieodłącznym wówczas zwiększeniem intensywności tworzenia się tlenków azotu w komorze roboczej silnika spalinowego. Wprawdzie jednocześnie rozwijane są tzw. niskoemisyjne systemy spalania, które pozwalają na zmniejszenie emisji tlenków azotu (np. spalanie niskotemperaturowe LTC, recyrkulacja spalin, spalanie wielostopniowe mieszanek ubogich), jednak nie działają one jednakowo skutecznie we wszystkich zakresach obciążeń i prędkości obrotowej silnika. W okresie ostatnich kilku lat szczególną uwagę zwraca się na układy redukcji emisji tlenków azotu jako nieodłącznego skutku zwiększania efektywności energetycznej napędów spalinowych. W tym zakresie bardzo dużo uwagi poświęca się metodzie Selekttywnej Redukcji Katalitycznej (SCR). O ile jednak zasady i warunki jej skutecznego działania w warunkach pracy ustalonej silnika są w dużym stopniu już rozpoznane i opanowane, szczególnie w warunkach badań homologacyjnych, o tyle problem utrzymania jej skuteczności w warunkach coraz dłuższej eksploatacji pojazdów i silników spalinowych nie stanowił dotychczas przedmiotu bardziej szczegółowych badań i analiz.

Dostrzegając ten problem i formułując odpowiednio zadania badawcze Doktorant wykazał się dobrą orientacją w zagadnieniach tzw. motoryzacyjnej ochrony środowiska. Uważam, że podjęta przez Autora tematyka badawcza jest aktualna i ważna ze względu na coraz silniej zauważany i akcentowany problem emisji szkodliwych związków toksycznych przez pojazdy samochodowe i silniki spalinowe w aspekcie ogólnie rozumianej czystości otaczającego nas powietrza. W rozprawie Autor przedstawił przekonujące uzasadnienie celowości podjęcia badań nad pogorszeniem się efektywności procesu selektywnej redukcji katalitycznej (SCR) w miarę jego eksploatacji oraz nad określeniem, które z czynników eksploatacyjnych mają największy wpływ na to pogarszanie. Na początku rozdz. 5 wskazał także, że znacząca emisja tlenków azotu szczególnie dotyczy silników o zapłonie samoczynnym, w których proces spalania odbywa się w otoczeniu bogatym w tlen, co zmniejsza skuteczność redukcji tlenków azotu w trójfunkcyjnym reaktorze katalitycznym (s. 28).

5. Ocena celowości tematu rozprawy i sformułowania problemu badawczego

Jak już wspomniano w punkcie 4 (tej recenzji), podjęty temat studiów i badań należy uznać za aktualny i ważny w kontekście zagadnień motoryzacyjnej ochrony środowiska. Zmniejszająca się skuteczność układów katalitycznego oczyszczania spalin w trakcie ich eksploatacji jest zagadnieniem wprawdzie już wcześniej dostrzeganym, jednak do tej pory nie wystarczająco sparametryzowanym i opisanym zależnościami funkcjonalnymi.

Pewną wątpliwość w tym zakresie budzi jednak samo sformułowanie tytułu rozprawy, gdyż zapowiada on ocenę wpływu dezaktywacji reaktora SCR na konwersję szkodliwych związków spalin silnikowych, podczas gdy w istocie w pracy rozważany jest jedynie jej wpływ na emisję związków azotu. Znajduje to wyraz w sformułowaniu naukowego celu badawczego (por. s. 29), gdzie mówi się o „(...) wpływie na emisję szkodliwych związków spalin, ze szczególnym uwzględnieniem emisji tlenku azotu NO, dwutlenku azotu NO₂, podtlenku azotu N₂O oraz amoniaku NH₃”. Podobnie napisano w podsumowaniu (s. 98). W istocie w pracy nie rozważa się innych składników niż te tutaj wymienione. W tym kontekście tytuł nie powinien wskazywać ogólnie szkodliwych związków spalin, lecz jedynie te poddane badaniom i analizie, czyli związków azotu.

Kolejną wątpliwość wywołuje użycie w tytule słowa „dezaktywacja”, które czasem używane jest także w niezalecanym brzmieniu „deaktywacja”, według Słownika języka polskiego PWN oznacza: 1) usuwanie skażeń promieniotwórczych, 2) pozbawienie czegoś aktywności. Oznacza ono więc przejście ze stanu aktywności do stanu nieaktywności, co ma charakter 0–1. W rozumieniu Doktoranta chodzi raczej o pogarszającą się zdolność do efektywnego (skutecznego) działania katalitycznego, czyli ciągłego pogarszania się właściwości katalitycznych

reaktora. Taką interpretację można zaakceptować, jednak ze względów metodycznych autorska definicja tego pojęcia powinna być sformułowana już we wstępie do pracy.

Innym wyrażeniem umieszczonym w tytule, a słabo zidentyfikowanym, jest pojęcie eksploatacji. Chodzi tu przecież o użytkowanie obiektu w dłuższym czasie, a zarówno upływ tego czasu, jak i intensywność użytkowania mogą być w wielu przypadkach silnie zróżnicowane. Jeżeli zatem jakiś parametr lub właściwość chcemy uzależnić od „eksploatacji”, to musimy przyjąć jakiś parametr (wielkość) stanowiący jej miarę: choćby czas albo – lepiej – całkowite, sumaryczne obciążenie w określonym czasie.

Autor słusznie zauważa (por. s. 29, 1. akapit), że „katalizator nie bierze czynnego udziału w reakcji chemicznej przebiegającej w jego ekspozycji. Jego rolą jest (...) zmniejszenie energii aktywacji danej reakcji chemicznej (...)”. Choćby ten zapis sugeruje, że utrata zdolności katalitycznej nie następuje zero–jedyńkowo, lecz zmienia się monotonicznie z upływem czasu i intensywności eksploatacji.

W tym kontekście sformułowanie „naukowego celu rozprawy” jako określenie wpływu dezaktywacji reaktora SCR w wyniku jego eksploatacji na emisję składników spalin zawierających azot wydaje się nietrafione, gdyż zawiera tezę dość oczywistą, że ten wpływ istnieje. Autor w domyśle pozostawił istotę badań, które zmierzały do określenia, jak silnie wpływał czas i intensywność eksploatacji na pogarszanie się skuteczności działania reaktora SCR. Niestety, zabrakło tutaj wyraźnego wskazania zmiennych niezależnych i zmiennych zależnych procesów badań i pomiarów. Nie sformułowano tutaj także wyraźnego kryterium uznania celu badawczego za osiągnięty, co utrudnia także dokonanie przekonującego podsumowania pracy (s. 98).

Jako cel użyteczny pracy Autor wskazał „określenie, które z czynników charakteryzujących reaktor mają najbardziej istotny wpływ na zwiększenie emisji NO_x w trakcie eksploatacji”. W następującym po tym fragmencie omówieniu metodyki badawczej oraz w rozdz. 6 nie wskazano, jak Autor rozumie „istotny wpływ” i w oparciu o jakie kryterium był on kategorizowany.

Definiując w tym rozdziale metodykę prowadzonych badań naukowych Autor wymienił (s. 29): analizę literatury..., analizę techniczną... systemów oczyszczania spalin, wskazanie problemów technicznych i eksploatacyjnych systemu SCR, określenie naukowego celu badawczego...; ten fragment powinien raczej pojawić się przed sformułowaniem tutaj celem naukowym, a nie po nim, gdyż podjęta analiza literatury i rozwiązań systemów SCR powinna prowadzić do podsumowania stanu wiedzy, następnie znalezienia braków i luk w tej wiedzy, które z kolei uzasadniałyby odpowiednie sformułowanie naukowego problemu badawczego, a nie odwrotnie. Tym niemniej ogólna koncepcja postępowania zmierzającego do rozwiązania sformułowanego przez Autora problemu badawczego jest poprawna i została konsekwentnie zrealizowana.

6. Konstrukcja metodologiczna pracy; zastosowana metoda badawcza i jej ocena

Przedłożona do oceny praca doktorska mgr inż. Jakuba Dzidy ma charakter głównie eksperymentalny, a oprócz rozbudowanych badań stanowiskowych, uzupełniono ją o istotne elementy studyjne.

Po rozdziale, w którym sformułowano naukowy cel pracy oraz jej cel użyteczny (rozdz. 5) zabrakło syntetycznego omówienia przyjętych metod badawczych oraz zastosowanej metodyki badań, a więc ogólnej koncepcji metodologicznej pracy. W rozdziale 6 Autor podejmuje omówienie badań reaktora SCR do silników maszyn niedrogowych (rozdz. 6.1), zaś w kolejnym podrozdziale (rozdz. 6.2) – do silników pojazdów ciężarowych. Brakuje jednak wcześniejszego wyjaśnienia, dlaczego Autor podjął badania takich, a nie innych układów katalitycznych, i jakie było merytoryczne bądź metodyczne uzasadnienie prowadzenia badań na tych różnych układach.

Metodyczna konstrukcja pracy jest w ogólności prawidłowa; dysertacja rozpoczyna się omówieniem stanu wiedzy na temat układów oczyszczanie spalin, ze szczególnym zwróceniem uwagi na ich działanie redukujące emisję tlenków azotu: reaktora utleniającego DOC (s. 7) reaktora adsorpcyjnego LNT (s. 8), filtra cząstek stałych DPF (s. 9). W kolejnym rozdziale (rozd. 4) Autor omówił bardziej szczegółowo systemy selektywnej redukcji katalitycznej SCR, wskazał charakterystyczne reakcje rozkładu termicznego NH_2 , NH_3 i NO_x (s. 12–14). W podrozdziale 4.3 (s. 14 i n.) Autor przeprowadził systematykę rozwiązań reaktorów SCR wskazując w większości rozwiązań zależność efektywności ich działania od temperatury spalin, co jednak okazuje się trudne do jednoznacznej interpretacji oraz ujęcia w jednoznaczny typ zależności przyczynowo-skutkowej (por. np. rys. 4.3 – wanad, 4.5 i 4.7 – zeolit). W tym rozdziale pojawia się także zależność graficzna sprawności konwersji NO_x w reaktorze wanadowym od temperatury spalin (zwiększa się do ok. 320°C i zaczyna się zmniejszać powyżej ok. 500°C ; jednocześnie wyraźnie wskazano, że sprawność ta przy stosowaniu wanadowego reaktora SCR postarzonego w wysokiej temperaturze (powyżej 700°C) jest o ok. 40% mniejsza, co wynika z utraty stabilności struktury warstwy katalitycznej w temperaturze powyżej 700°C ; Autor zwraca na to uwagę na s. 16.

W rozdziale 4.4. Autor wprowadza zagadnienie oczyszczania spalin z amoniaku NH_3 , który jest doprowadzany do spalin w systemach SCR, jednak nie zawsze ulega całkowitemu wykorzystaniu w procesie konwersji katalitycznej, co często wymaga dodatkowego zastosowania reaktora typu ASC (*Amonia Slip Catalyst*) utleniającego nadmierne ilości NH_3 poprawiającego bilans emisji tlenków azotu (por. s. 22).

W kolejnym podrozdziale Autor omówił normatywne limity emisji tlenków azotu i amoniaku w spalinach silników spalinowych maszyn drogowych, pojazdów samochodowych i maszyn drogowych (tab. 4.1, 4.2, 4.3) wskazując na ich coraz bardziej restrykcyjny poziom, niemożliwy już do osiągnięcia bez zastosowania nowoczesnych układów selektywnej redukcji katalitycznej SCR (rozd. 4.5). Przedstawił także wymagania dotyczące okresu eksploatacji, które zakładają utrzymanie przyjętych wartości granicznych (tab. 4.4–4.6, s. 24). Na zakończenie tego podrozdziału (s. 24) pojawia się uwaga Autora, że warunkiem spełnienia norm emisji tlenków azotu jest żywotność układu oczyszczania spalin (ATS – *Aftertreatment System*). Wskazany tutaj tekst powinien być przez Autora jeszcze raz powtórzony i podkreślony w uzasadnieniu sformułowania problematyki badawczej pracy jako wniosek z analizy stanu wiedzy.

W podrozdziale 4.7 Autor podsumowuje analizę literatury w zakresie podejmowanej problematyki badawczej stwierdzając m.in. że:

- 1) w silnikach o ZS systemy selektywnej redukcji SCR z użyciem amoniaku stanowią podstawową metodę zmniejszenia emisji tlenków azotu,
- 2) systemy SCR są najefektywniejszą metodą zmniejszania tej emisji i – w konsekwencji – stały się tego podstawową metodą,
- 3) reaktory SCR są podatne na stopniową utratę efektywności działania („stopniową dezaktywację”, s. 28) z upływem okresu użytkowania,
- 4) stopień utraty sprawności konwersji reaktora SCR kształtuje rzeczywistą emisję tlenków azotu w trakcie eksploatacji.

Wnioski te pozwoliły Autorowi na ostateczne sformułowanie problematyki badawczej, które zawarł w rozdziale 5 (por. pkt. 5 recenzji).

7. Analiza i ocena części badawczej rozprawy

Część badawczą pracy Autor rozpoczął od omówienia obiektów badań, którymi w istocie są reaktory SCR (*Selective Catalytic Reduction*) dwóch rodzajów: przeznaczony do maszyn niedrogowych (rozd. 6.1) oraz drugi – przeznaczony do samochodów ciężarowych (rozd. 6.2), tak jak to wcześniej zapowiedział, choć wyboru tego przekonująco nie uzasadnił (por.

uwaga w punkcie 6 recenzji). Obiekty te zostały opisane wyczerpująco z uwzględnieniem specyfiki zachodzących w nich procesów chemicznych (s. 30 – 34). Warto zwrócić uwagę, że obiekt drugi został dodatkowo wyposażony w filtr cząstek stałych DPF (por. rys. 6.1 i 6.3), co utrudnia trochę bezpośrednie porównanie uzyskiwanych wyników pomiarów, ale oddaje lepiej występujące realia praktyki konstrukcyjnej.

Opisy obiektów uzupełniono zestawieniami podstawowych danych dotyczących silników spalinowych, które w procedurze badawczej nie stanowią przedmiotu badań, a jedynie źródło spalin. Oba silniki są typu ZS, jednak ze względu na różne zastosowanie badanych układów SCR silniki te się istotnie różnią, co wynika m.in. z wymaganego strumienia spalin i zakresu obciążeń. Jeden silnik jest 4-cylindrowy ($V_{ss} = 4,5 \text{ dm}^3$) o mocy ok. 100 kW, drugi natomiast – 6-cylindrowy ($V_{ss} = 6,7 \text{ dm}^3$) o mocy ok. 230 kW. Oba silniki są turbodoładowane wyposażone w regulację upustową i mają wtrysk bezpośredni typu akumulatorowego (ang. *Common Rail*).

W obu opisach układów SCR Autor wspomina o umożliwieniu „(...) kontrolowanego starzenia reaktora SCR” (s. 32, 34), jednak brakuje tutaj odnośnika do opisu sposobu starzenia (zawartego w rozdz. 10), który może mieć istotny wpływ na ostatecznie uzyskiwane wyniki badań.

Po opisie obiektów badań Autor omówił stanowisko badawcze (rozdz. 7.1) oraz aparaturę pomiarową (rozdz. 7.2, 7.3). Na s. 36 tabelarycznie zostały zestawione narzędzia pomiarowe (AVL Puma, ABB Sensyflow, Horiba Mexa itp.), ich zakresy i dokładności pomiarowe (Uwaga: Tabela 8.1 – powinno być: 7.1). Warto tutaj odnotować zastosowanie nowoczesnej aparatury badawczej spełniającej standardy światowe, której dokładności pomiarowe nie przekraczają 0,5 – 1,0%, więc pomiary są wystarczająco dokładne do naukowej analizy ich wyników.

Omówione w podrozdziałach 7.2 i 7.3 czujniki i analizatory spalin także spełniają wszystkie współczesne wymagania pomiarowe i badawcze. Krótko tutaj omówiono zasady pomiarów analizatorem chemiluminescencyjnym CLD, słusznie zwracając uwagę na konieczność stosowania dwóch analizatorów dla zapewnienia pomiarów zarówno NO, jak i NO_x (s. 38). Wspomniano także o wykorzystanym analizatorze LDD (spektrometrii laserowej) dla oznaczenia emisji amoniaku (bliska podczerwień) oraz o analizatorze NDIR (selektywna absorpcja w podczerwieni) dla oznaczenia emisji CO₂ i N₂O (s. 39). W podrozdziale 7.3 scharakteryzowano standardowe czujniki pomiaru emisji przedmiotowych związków toksycznych stosowane w standardowych układach oczyszczania spalin (ATS, s. 39 – 40).

Rozdział 8 zawiera omówienie cykli pomiarowych przyjętych w badaniach emisji tlenków azotu dla maszyn niedrogowych: cyklu stacjonarnego (*Ramed Mode Cycle*, podrozdz. 8.1), cyklu niestacjonarnego (*Non-Road Transient Cycle*, podrozdz. 8.2 – błędnie oznaczony jako 8.1) oraz dla silników trakcyjnych do pojazdów ciężarowych: cyklu stacjonarnego (*World Harmonized Steady Cycle*, podrozdz. 8.3 – błędnie oznaczony jako 8.2) i cyklu niestacjonarnego (*World Harmonized Transient Cycle*, podrozdz. 8.4 – błędnie oznaczony jako 8.3). W przypadku cykli stacjonarnych uwzględniana jest także emisja w ośmiu stanach przejściowych (por. s. 41). W pierwszym przypadku cykl trwa 1800 sek., w drugim – 2x1238 sek. (w sumie ponad 71 min.), w trzecim – 1895 sek., w czwartym – 2x1800 sek. (ponad 91,5 min.). Wprawdzie dla różnych silników obowiązują zatem nieco inne procedury pomiarowe, to jednak można przyjąć, że są one zbliżone, a uzyskane wyniki można między sobą porównywać, z pewnymi zastrzeżeniami wynikającymi ze specyfiki różnego rodzaju użytkowania obu rodzajów silników.

W podrozdziale 8.5 (błędnie oznaczonym jako 8.4) Autor stwierdził, że do obliczeń emisji jednostkowej wykorzystał program narzędziowy iGEM bez komentarza na temat jego budowy. Wydaje się jednak celowe choćby krótkie opisanie stosowanych w tym programie procedur obliczeniowych, szczególnie przyjętych założeń i uproszczeń, dla umożliwienia czytelnikowi wyrobienia sobie opinii o klasie dokładności zastosowanej procedury lub umożliwienia

ewentualnego wykonania przeliczeń sprawdzających. Taki skrótowy opis mógł być umieszczony w załączniku do pracy.

W równaniu (25) w tym rozdziale nie bardzo wiadomo, jak interpretować literę *f* (współczynnik, funkcja – jaka?).

W rozdziale 9 Autor omówił mechanizmy dezaktywacji reaktorów SCR (zeolitowych), w którym wyróżnił dezaktywację odwracalną (osadzanie się związków zmniejszających aktywność katalityczną) i nieodwracalną (rozpad porowatej struktury zeolitu). Tutaj też pojawia się przypisanie słowa „dezaktywacja” do zmniejszenia konwersji NO_x wraz z okresem użytkowania reaktora (s. 45). Ja wolałbym użyć sformułowania: „zmniejszenie stopnia konwersji w czasie użytkowania reaktora”, a zamiast słowa „dezaktywacja” wolałbym: „pogorszenie skuteczności konwersji” – są to jednak wątpliwości dyskusyjne.

W tym rozdziale Autor wyróżnił dezaktywację hydrotermalną (rozd. 9.2), związkami siarki (rozd. 9.4), chemiczną (rozd. 9.5) oraz taką wynikającą z akumulowania węglowodorów na warstwie aktywnej reaktora (rozd. 9.3) lub osadami mocznika (rozd. 9.6). W poszczególnych jej rodzajach Autor wskazał na zależność procesów od temperatury, zawartości wody w spalinach, emisji węglowodorów, zawartości siarki oraz innych dodatków uszlachetniających paliwa silnikowe (Ca, Zn, P, por. s. 51), osadów mocznika. Przeprowadzona tutaj analiza i systematyka jest – moim zdaniem – bardzo pouczająca oraz przydatna naukowo i dydaktycznie.

Bazując na analizie przyczyn zmniejszenia efektywności konwersji tlenków azotu przedstawionych w rozdz. 9 Autor omówił w rozdz. 10 sposoby starzenia reaktorów SCR. Jest to część pracy istotna ze względu na przyjęty cel główny i domyślną tezę badawczą. Dla systemu o zastosowaniach pozadrogowych wyróżniono 3 części procesu starzenia polegające na pracy silnika na stanowisku hamownianym w różnych warunkach i czasie trwania: pierwsza trwająca 2 h 10 min, druga trwająca 1 h 30 min, trzecia trwająca 1 h 20 min, w sumie 5 h. 50-cio krotne powtórzenie takich cykli pracy dało sumaryczny czas pracy 250 h (s. 55). Jest to istotna zmiana w stosunku do dotychczas stosowanych procedur starzenia prowadzonych przy dwóch różnych poziomach temperatur spalin, gdyż nowo zaproponowana procedura w większym stopniu uwzględnia zmienność warunków pracy silnika oraz występowania tzw. zimnych rozruchów, szczególnie szkodliwych dla pogorszenia efektywności działania reaktorów katalitycznych. W odniesieniu do systemów SCR stosowanych w silnikach trakcyjnych wykonano 22 powtórzenia cykli pracy wynikających z omówionych wcześniej testów homologacyjnych, co dało sumaryczny czas pracy 178 h 56 min (s. 57). W tym czasie wystąpiły 132 zimne rozruhy, szczególnie silnie wpływające na pogarszanie zdolności konwersji reaktorów SCR.

Podsumowując ten fragment pracy można uznać, że Autor bardzo starannie opracował i przygotował procedury badawcze, w tym procedury starzenia reaktorów SCR, tworząc dobrą i naukowo uzasadnioną bazę do pozyskania rzetelnych wyników oraz ich adekwatności do warunków realnego użytkowania i reprezentatywności dla wyprowadzenia uogólnionych wniosków badawczych.

Analizując uzyskane wyniki Autor stwierdził, że silnik do maszyn niedrogowych z postarzoną reaktorem SCR w teście NRSC wykazał emisję jednostkową NO_x zwiększoną o 118%, a maksymalne stężenie NH_3 zwiększyło się o 46% (rozd. 11.1). W warunkach testu NRTC wartości te wzrosły odpowiednio o 157% i 22% (rozd. 11.2). Zwrócono przy tym uwagę, że na wzrost emisji jedn. NO_x większy wpływ miała praca systemu w fazie „cieplej”, a na stężenie NH_3 – faza „zimna”. W obu testach poddano analizie przebiegi zmian emisji oraz sprawności konwersji w poszczególnych fazach, w czasie ich wykonywania (rys. 11.1, 11.2, 11.3, 11.4, 11.5 i 11.6). Analiza ta jest obszerna i szczegółowa (por. s. 58 -71).

Podobnej analizie dotyczącej takiej samej zależności dla silników trakcyjnych Autor poświęcił strony 71 do 90 (rozd. 11.3 i 11.4). Ustalił, że w takim zastosowaniu postarzony reaktor SCR powoduje w cyklu WHSC powiększenie emisji jednostkowej NO_x o 190%, emisji

jednostkowej N_2O o ponad 2000%, zaś maksymalnego stężenia o 750%. W cyklu WHTC odpowiednie wartości wyniosły: 143%, 665% oraz 200%. Podobnie jak w przypadku testów dla silników do zastosowań niedrogowych także tutaj poddano szczegółowej analizie przebiegi zmian śledzonych wielkości w poszczególnych fazach i w czasie obu cykli WSHC oraz WHTC, co pokazano na rysunkach odpowiednio: 11.10, 11.11, 11.14, 11.15.

W tej części analizy przedstawiono także wykresy zmienności sprawności konwersji NO_x w zależności od stężenia NO_2 (rys. 11.12 i 11.16). Ponieważ są one oryginalne i trudne w jednoznacznej interpretacji, wydaje mi się celowe, żeby Autor omówił je dodatkowo w czasie prezentacji pracy doktorskiej.

Wnioski z pracy i jej podsumowanie Autor zawarł w rozdziale 12. Ocena wpływu dezaktywacji reaktora na emisję wybranych związków toksycznych zawarta została w rozdz. 12.1, ocena wpływu na wskaźniki operacyjne – w rozdz. 12.2. W rozdziale 12.2 zebrane zostały wnioski syntetyczne, a w rozdz. 12.4 przedstawiono podsumowanie pracy.

W rozdz. 12.1 Autor wyróżnił wnioski dotyczące emisji NO_x . W istocie jednak zawarł w tym miejscu dość rozbudowane rozważania na temat wyników badań dotyczących takiej emisji (s. 90), które częściowo mogły się znaleźć w rozdziale poprzednim. Nieco bardziej ograniczone rozważania dotyczą emisji NO i NO_2 (s. 92), emisji NH_3 i N_2O (s.93). W rozdz. 12.2 Autor podsumowuje wpływ dezaktywacji reaktora SCR na wskaźniki opisujące jego pracę (wskaźniki operacyjne?). Oceniono zdolność magazynowania amoniaku (s. 93), maksymalnej sprawności konwersji NO_x (s. 94), wpływu temperatury reaktora SCR oraz temperatury spalin (s. 95), a także działania temperatury spalin, na strukturę warstwy aktywnej reaktora.

Na zakończenie Autor sformułował wnioski syntetyczne (s. 96 – 98), które podzielił na wnioski dotyczące zmiany emisji wybranych składników spalin, zmiany parametrów reaktora SCR i na wnioski ogólne. Przytoczone tutaj zostały liczne wnioski, które jednak w niektórych przypadkach zostały sformułowane zbyt ogólnikowo. Brakuje w nich potwierdzenia ilościowego ogólnych sformułowań jakościowych oraz odwołania do określonych wyników we wskazanych (np. przez nr strony lub podrozdziału) fragmentach pracy. Nie wszystkie wnioski wynikają z warstwy badawczej, gdyż część z nich dotyczy wyników badań literaturowych; te drugie wnioski powinny się zatem znaleźć w zakończeniu rozdziału 4 lub na początku rozdziału 5.

W rozdziale 12.4 zawarto podsumowanie, w którym potwierdzono osiągnięcie podstawowego celu naukowego pracy, a także jej celu utylitarnego. Szkoda, że w tym miejscu nie wspomniano także o istotnym osiągnięciu w zakresie opracowania oryginalnej metodyki badawczej przedstawionej w rozdziałach 9 i 10. Autor tutaj niepotrzebnie podjął ponownie pewną dyskusję wyników, która powinna się znaleźć przed formułowaniem wniosków końcowych. Wnioski prognostyczne Autor zawarł w następnym rozdziale.

W rozdziale 13 Autor sformułował swoje propozycje dotyczące kierunków dalszych prac badawczych i rozwojowych. Wskazał na celowość badań reaktorów po dużym przebiegu w warunkach rzeczywistej eksploatacji, co pozwoliłoby na ustalenie korelacji między utratą zdolności konwersji w reaktorach postarzonych doświadczalnie i po starzeniu naturalnym.

Autor sugeruje także rozbudowanie stanowiska badawczego o dodatkowe punkty pomiaru emisji spalin w celu lepszego diagnozowania współdziałania reaktora SCR z tradycyjnym układem ATS.

Ważnym wnioskiem rozwojowym wydaje się sugestia dotycząca celowości i możliwości opracowania metody diagnozowania stopnia zużycia reaktora SCR na podstawie jego zdolności magazynowania NH_3 . Wprowadzenie do systemu diagnozowania modelu zależności zdolności konwersji od zmniejszenia zdolności do magazynowania NH_3 mogłoby silnie wzbogacić system sterowania silnikiem ze względu na emisję związków toksycznych.

Ostatni rozdział pracy stanowi spis wykorzystanej literatury. Zawiera on 77 pozycji, w większości obcojęzycznych, pochodzących ze źródeł o uznanej wartości naukowej, w znacznej większości opublikowanych w ciągu ostatnich kilkunastu lat, więc najnowocześniejszej. Nowoczesność, zakres oraz sposób wykorzystania literatury przedmiotu oceniam zatem bardzo dobrze.

8. Ocena językowa i redakcyjna

Praca mgr inż. Jakuba Dzidy napisana jest bardzo dobrym stylistycznie językiem, bez zwykle spotykanych w takich pracach powtórzeń, zwrotów potocznych, błędów gramatycznych, z bardzo nielicznymi błędami stylistycznymi. Używana przez Autora terminologia jest na ogół właściwa, choć w kilku miejscach może nieco brakować definicyjnego uściślenia użytych fachowych pojęć. Autor operuje językiem poprawnym i komunikatywnym, a nieliczne drobne odstępstwa od tej reguły w żadnym stopniu nie umniejszają pozytywnej opinii. Materiał ilustracyjny, jego dobór, jakość wykonania, czytelność i komunikatywność są w pełni zadowalające.

Czytanie tekstu, miejscami bardzo skondensowanego i trudnego w szybkim zrozumieniu, utrudnia trochę brak jednolitej definicji akapitu (czasem z wcięciem akapitowym, częściej bez niego), co utrudnia „kwantowe” odbieranie przekazywanych informacji. Czasem akapit powinien być podzielony na 2 (np. s. 16).

Do istotniejszych błędów lub braków redakcyjnych zaliczyłbym:

- błąd w numeracji podrozdziałów 8.1 – 8.4,
- błąd w numeracji rysunku 8.1,
- błąd numeracji Tabela 8.1, s. 36 – powinno być: 7.1; s. 43 – Tabela 8.1 – powinno być: 8.2;
- błąd w numeracji tabeli 8.2,
- niektóre rysunki umieszczone w tekście przed ich przywołaniem (np. rys. 4.1, 4.2, 4.5, 4.10, 8.1); to samo dotyczy tabel (np.: tab. 4.4, 4.5, 4.6, 7.1(8.1));
- stosowanie słowa „poprzez” zamiast „przez” (np. s. 5, 6, 7, 28, 35),
- nieliczne braki interpunkcyjne; po przecinku powinna być spacja (np. w przywołaniu literatury [68,69] – s. 46, w. 3 d., s. 47, w. 17 g., w. 9 d., w. 1 d., s. 49 (2x), s. 51, w. 10 d.;

W trakcie czytania zauważyłem także inne błędy szczegółowe:

- s. 5, ost. ak. – „Zastosowanie powyższych rozwiązań (...)” – „powyżej” nie mówi się o jakiś rozwiązaniach;
- s. 6, rozdz. 3.1, koniec 1. ak. „odnotowana jest także emisja (...), co spowodowało konieczność (...)” – odnotowanie nie powoduje konieczności;
- s. 14, rozdz. 4.3 – „(...) odnotowanym przypadkiem (...) przy użyciu amoniaku.” – styl;
- s. 24 – „żywołność układu ATS” – jak ją definiować?
- s. 32, w. 2 d. – „w skutek” – powinno być „wskutek” lub „na skutek”;
- s. 35, w. 3 d. – „przetawiono” – powinno być: „przedstawiono”;
- s. 37, w. 5 g. – „Ponadto” – zbędne;
- s. 41, tab. 8.1 – niejednolita czcionka (szeryfowa + bezszeryfowa);
- s. 41, w. 3 d. – „przeprowadzone zostają” – albo „zostały przeprowadzone” albo „są prowadzone”;

Inne, drobne redakcyjne poprawki tekstu, nieistotne ze względu na ocenę merytoryczną pracy, naniesione na egzemplarz recenzyjny przekażę bezpośrednio Autorowi.

W *Streszczeniu* opracowanym w języku polskim napisano: „celem pracy było zbadanie w sposób naukowy”; takie sformułowanie jest niezręczne, gdyż celem pracy naukowej powinno być określenie jakiś nowych zależności przyczynowo-skutkowych lub wyjaśnienie

procesów i przemian. Badanie i analiza wyników jest tylko sposobem dochodzenia do naukowych wniosków opisujących wspomniane zależności.

Istotnym mankamentem *Streszczenia* jest akcentowanie tego, co Autor robił, badał, analizował, nie zaś tego, co osiągnął. Stwierdzenie, że postarzony reaktor SCR powoduje zmniejszenie stopnia konwersji (sprawności) związków azotu jest wprawdzie jakościowo prawdziwe, ale w takiej pracy oczekiwaloby się także pewnej oceny ilościowej, najlepiej funkcjonalnej. Nie wszystkie istotne osiągnięcia Autora znalazły swój wyraz w *Streszczeniu*.

9. Podsumowanie i konkluzja

Czytając pracę naukową w naturalny sposób dostrzega się wszelkie niedostatki i braki metodologiczne, stylistyczne i redakcyjne. Tego rodzaju wrażliwość czytającego obciążona jest jednak jego indywidualnym postrzeganiem problemu, sposobu relacjonowania, przyzwyczajeniami stylistycznymi i redakcyjnymi. Istnieje wówczas niebezpieczeństwo nadmiernego akcentowania pewnych uchybień pisarskich i redakcyjnych, nie zaś złożoności procesów badawczych i znacznego wysiłku twórczego autora. Pisząc zatem opinię o pracy trzeba starać się spojrzeć na problem badawczy i sposób jego rozwiązania z dalszej, mniej osobistej perspektywy.

W przypadku pracy doktorskiej mgr inż. Jakuba Dziuby muszę wyraźnie przyznać, że w pełni doceniam podjęty przez Doktoranta wysiłek badawczy oraz determinację w rozwiązaniu złożonego zagadnienia naukowego i technicznego. Wprawdzie uważam, że można było nieco lepiej i wyraziściej sformułować sam problem badawczy i kryteria jego rozwiązania, jednak w istocie Autor taki problem rozwiązał tworząc swój unikalny warsztat badawczy, a także swoją oryginalną metodykę badawczą, którą konsekwentnie i z powodzeniem zastosował. Można było na koniec pokusić się jeszcze o choćby częściową ocenę ilościową wpływu stopnia postarzenia reaktora SCR na sprawność konwersji związków azotu, jednak pozyskany materiał badawczy może stanowić wartościowy zaczyn do dalszej analizy tego rodzaju.

Biorąc powyższe pod uwagę chcę stwierdzić, że mgr inż. Jakub Dzida poprawnie i przekonująco zweryfikował swoje cele naukowo-badawcze, osiągając tym samym cel merytoryczny pracy badawczej. Ponieważ dla realizacji tego celu opracował autorską i nowatorską metodykę badawczą, więc metodyczna ocena tej pracy powinna być także wysoka. Podkreślić należy też bardzo obszerny i nowoczesny warsztat badawczy oraz zakres i jakość przeprowadzonych badań. Uzyskane wyniki i wnioski mogą również być wykorzystane w praktyce inżynierskiej, szczególnie w ocenie przydatności układów SCR po dłuższym okresie eksploatacji.

Można także stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest opracowaniem naukowym o istotnych walorach poznawczych. Na dodatkowe podkreślenie zasługuje fakt, że nie budzi żadnych ważnych zastrzeżeń pod względem językowym i stylistycznym.

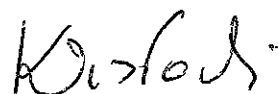
Opiniowana praca wykazuje pewną ważną cechę prac naukowych: obok rozwiązanych zagadnień i udzielanych odpowiedzi pozwala na sformułowanie licznych kolejnych pytań badawczych o istotnych walorach poznawczych.

Przedstawiona rozprawa, zgodnie z wymogami art. 13, p. 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym..., stanowi moim zdaniem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazała ogólną wiedzę kandydata i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Oceniając zatem pozytywnie treść rozprawy, jej warstwę badawczą i studyjną oraz osiągnięcia Autora w zakresie prowadzenia złożonych badań naukowych uważam, że **przedstawiona przez mgr. inż. Jakuba Dzidę rozprawa doktorska** stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego przez Niego naukowego problemu badawczego oraz wskazuje na Jego ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej **Budowa i eksploatacja maszyn, spełnia więc wymagania art. 13, pkt. 1 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym** oraz

stopniach w zakresie sztuki (Dz.U.2017.0.1789, stan prawny aktualny na dzień: 12.07.2019), w zakresie dotyczącym rozpraw doktorskich. **Stawiam więc wniosek o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.**

Ponadto, biorąc pod uwagę naukową oryginalność i nowatorski charakter podjętych zagadnień, poprawność metodologiczną oraz rozbudowaną warstwę badawczą rozprawy, a także dobrą jakość edytorską, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Dzidy stosowną nagrodą.



Krzysztof Wisłocki