

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Instytut Silników Spalinowych i Napędów
Politechniki Poznańskiej

Poznań, 4 lipca 2023 roku

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Szwai pt. „Badanie przebiegu tworzenia mieszanki palnej za pomocą wtrysku kondensatu pirolitycznego w komorze o stałej objętości”

podstawa opracowania: pismo Kierownika Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej, dr hab. inż. Janusza Szmidli, prof. PCz (pismo R-WIMiI-BOD-510-8/20 z dnia 22.05.2023 r.).

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Wprowadzenie coraz bardziej rygorystycznych norm emisji związków toksycznych spalin oraz powszechny nacisk na zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w Unii Europejskiej kieruje prace badawczo-rozwojowe na rozwój konstrukcji nowych, niskoemisyjnych pojazdów, używanie paliw alternatywnych, rozwój konstrukcji nowych typów silników i zwiększanie sprawności obecnie produkowanych jednostek napędowych.

Szczególnie kontrowersyjny jest pakiet *Fit for 55*, przyspieszający transformację energetyczną i realizację polityki klimatycznej Unii Europejskiej, w którym zawarte były propozycje zakazu sprzedaży nowych samochodów z silnikami spalinowymi od 2035 roku. Z kolei planowane wprowadzenie normy emisyjnej Euro 7 stanowi wyzwanie dla producentów pojazdów. Dotyczy ona ograniczenia o co najmniej 50% emisji spalin i emisji CO₂ (zużycia paliwa), co zmusza producentów do poniesienia znaczących kosztów na rozwój i doskonalenie swoich pojazdów.

Zatem należy stwierdzić, że Komisja Europejska nie może się porozumieć co do zależności pomiędzy *Fit for 55* i Euro 7. Jeśli byłaby utrzymana propozycja „likwidacji” samochodów z silnikami spalinowymi od 2035 r., to dyskusyjny byłby sens wprowadzania surowych przepisów Euro 7 tylko na parę lat. Producenci aut i silników nie byłiby zapewne w tej sytuacji skłonni do zaakceptowania wysokich kosztów adaptacji do normy Euro 7.

Pod koniec marca tego roku Rada Unii Europejskiej ostatecznie przegłosowała przepisy, które zakładają 100% redukcji emisji dwutlenku węgla w przypadku nowych pojazdów po 2035 roku, co oznaczałoby zakaz kupna i rejestracji nowego auta z silnikiem

spalinowym. Będzie jednak od tej zasady wyjątek, który przeforsowali Niemcy – dozwolone pozostaną te samochody benzynowe, które będą zasilane ekologicznym paliwem, przy produkcji którego odzyskuje się dwutlenek węgla z atmosfery. Zatem unijny zakaz sprzedaży nowych samochodów spalinowych od 2035 roku nie dotyczy pojazdów zasilanych paliwem syntetycznym (e-paliwo) lub wodorem. Konsekwencją tego faktu jest konieczność zintensyfikowania prac nad opracowaniem nowych paliw do silników spalinowych.

Od wielu lat rozwój ekologicznych paliw silnikowych był wspierany przez realizację licznych programów badawczych ukierunkowanych głównie na ograniczanie emisji składników toksycznych oraz osiągi, trwałość i inne wskaźniki pracy silników spalinowych. Jednym z pierwszych takich programów był AQIRP (Auto/Oil Air Quality Improvement Research Program – Samochodowo-Paliwowy Program Badawczy Poprawy Czystości Powietrza) prowadzony w USA. Ocena wpływu paliwa na emisję związków toksycznych była również jednym z elementów realizowanego w Japonii programu JCAP (Japan Clear Air Program – Japoński Program Czystego Powietrza). W Unii Europejskiej prowadzony był program EPEFE (European Programme on Emissions, Fuels and Engine Technologies – Europejski Program Badawczy Emisji, Paliw i Technologii Silnikowych), zwany w skrócie programem Auto-Oil. Wszystkie te programy jednoznacznie potwierdziły, że paliwa mają kluczowy wpływ na poziom i właściwości chemiczne emitowanych związków toksycznych spalin. Naukowcy pracujący na rzecz ochrony środowiska nadal podtrzymują tezę, że rodzaj i właściwości paliw mają duży potencjał w ograniczaniu negatywnego oddziaływania środków transportu na środowisko naturalne.

W związku z tym, a także z powodu ogromnego nacisku społeczeństw na ochronę środowiska naturalnego, problem wpływu paliw na parametry pracy i emisję silników jest rozwiązywany przez dużą liczbę ośrodków naukowych, badawczych i przemysłowych, dysponujących często ogromnymi możliwościami finansowymi. O ważności tego zagadnienia świadczy znaczna liczba publikacji opisujących tą tematykę. To właśnie wyżej wymienionemu zagadnieniu poświęcona jest recenzowana praca, w której Autorka opracowała, między innymi, metodykę oceny przydatności paliw dla silników spalinowych. Jeżeli uwzględnić co napisano wyżej – jej tematyka, cel i zakres są wybrane bardzo trafnie.

Mając to na uwadze można uznać, że tematyka podjęta przez Autorkę pracy jest uzasadniona pod względem poznawczym, a ponadto ma istotny wymiar aplikacyjny.

2. OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Magdaleny Szwai liczy 119 stron i składa się z 6 głównych rozdziałów, w tym wniosków słusznie podzielonych na ogólne, szczegółowe, utylitarne i przyszłościowe. Ponadto praca zawiera bibliografię obejmującą 74 pozycji, w tym większość obcojęzycznych. Aktualność cytowanej w pracy literatury świadczy o dobrym rozeznaniu Autorki w tematyce rozprawy. Podjęcie problemu naukowego zostało poprzedzone analizą stanu wiedzy z zakresu rozważanej tematyki rozprawy i dobrze uzasadnione.

Problemem badawczym było opracowanie metodyki badawczej zapewniającej prawidłowy przebieg badań i uzyskanie wiarygodnych wyników przy akceptowalnym poziomie niepewności pomiarowej.

Autorka sformułowała cele pracy, którymi były:

- rozpoznanie przebiegu wtrysku i rozpylania oleju pirolitycznego w warunkach temperatury i ciśnienia atmosferycznego,
- rozpoznanie przebiegu wtrysku, zapłonu i przebiegu spalania oleju pirolitycznego w komorze o stałej objętości w warunkach podwyższonego ciśnienia i temperatury, typowych dla silnika ZS,
- wykonanie analizy porównawczej badanego paliwa z benzyną i olejem napędowym.

Doktorantka sformułowała także następujące trzy tezy:

1. Zjawiska rozpylania i tworzenia mieszanki palnej oleju pirolitycznego uzyskanego po destylacji surowej cieczy pochodzącej z pirolizy HDPE przebiegają podobnie do zjawisk występujących dla typowej benzyny 95 w instalacji bezpośredniego wtrysku w silniku ZI.
2. Badana ciecz może być zastosowana jako zamiennik dla benzyny 95 do zasilania nowoczesnego silnika samochodowego wyposażonego w instalację wysokociśnieniowego wtrysku bezpośredniego.
3. Przebieg spalania oleju pirolitycznego zachodzi szybciej, ze względu na większy udział fazy spalania kinetycznego w porównaniu do przebiegu spalania oleju napędowego.

Dla zrealizowania pracy doktorskiej, o charakterze głównie empirycznym, należało wykonać następujące główne zadania:

- badania wstępne w zakresie analizy parametrów fizykochemicznych dla badanego oleju pirolitycznego,
- badania przebiegu wtrysku i rozpylania dla oleju pirolitycznego, benzyny i oleju napędowego, wspomagane rejestracją szybką kamerą cyfrową,
- badania przebiegu wtrysku, rozpylania, zapłonu i przebiegu spalania dla oleju pirolitycznego i oleju napędowego w warunkach typowych dla silnika ZS, wspomagane rejestracją szybką kamerą cyfrową.

Niedociągnięcia pracy:

1. Brak możliwości oceny niezupełności spalania i pomiaru stężenia CO, NO_x i HC po spalaniu dawki oleju pirolitycznego w komorze ze względu na niewielką ilość powstałych spalin.
2. Badania spalania przeprowadzono w polu bezwirowym. W rzeczywistym silniku występuje zawirowanie powietrza lub mieszanki palnej w chwili zamknięcia zaworu dolotowego, a następnie zawirowanie wskutek wyciskającego działania tłoka i kształtu jego denka podczas suwu sprężania.
3. Nie opracowano modelu numerycznego dla wtrysku np. w programie ANSYS Fluent i w konsekwencji nie przeprowadzono symulacji przebiegu wtrysku i rozpylania. Taki model po właściwym skalibrowaniu mógłby służyć do analizy w warunkach pracy silnika tłokowego, chociaż jest to zagadnienie trudne i niesie ze sobą ryzyko dużej pomyłki w modelowaniu.
4. Szerszego komentarza, opisu i interpretacji wymaga rysunek 5.25, umieszczony na 7 stronach! (str. 87–93).
5. Nie ma praktycznego sensu wartość wyliczonej pochodnej szybkości zmiany ciśnienia dp/dt podczas spalania, której wynik wynosi 5400 MPa/s.

Uwagi szczegółowe:

1. Na str. 40 Autorka napisała: „C₂H₂ w ilości 3%” i podobnie dalej, a powinno być: C₂H₂ w stężeniu 3%.
2. Tytuł rozdziału „5. Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza”, lepiej byłoby „5. Wyniki badań empirycznych i ich analiza”.
3. Dziwna nazwa „5.1. Matryca badań”.

Uwagi edytorskie:

1. Użyta terminologia w niektórych fragmentach jest nieprecyzyjna, np. stosunkowo, relatywnie itp.
2. Słowo „fizykochemiczne” pisze się razem – błędnie str. 22 i 59.
3. Błędny zapis ułamków dziesiętnych (w języku polskim obowiązuje przecinek – nie kropka) str. 69 – tablica 5.2.

Osiągnięcia pracy:

Mimo powyższych uwag i sugestii, niektórych dyskusyjnych, bardzo wysoko oceniam poziom merytoryczny rozprawy i to zarówno ze względu na intelektualny wkład Autorki, jak i na zakres włożonej przez Nią pracy. Uwagi te nie umniejszają mojej wysokiej oceny pracy.

Największym osiągnięciem pracy jest oryginalnie i twórcze podejście do opracowania prawidłowej metodyki badawczej, które umożliwia ocenę przydatności paliwa do zastosowania w silniku spalinowym. Ta metodyka umożliwia uzyskanie wiedzy w zakresie kluczowych z punktu widzenia celu pracy kwestii takich jak:

- ocena przydatności danego paliwa (w pracy: oleju pirolitycznego) jako potencjalnego paliwa silnikowego,
- ocena jakościowa tworzenia mieszanki palnej w cylindrze silnika przez wtryskiwacz wysokociśnieniowy na podstawie właściwości fizycznych tego oleju,
- powiązanie wielkości opisujących wtrysk z wybranymi wskaźnikami/liczbami kryterialnymi oraz analiza porównawcza wtrysku, rozpylania, samozapłonu i rozwoju płomienia.

Tak opracowana metodyka może służyć do oceny przydatności różnych paliw w zastosowaniu dla silników spalinowych. Ponadto na podkreślenie zasługują następujące walory pracy:

1. Praca dotyczy badań nad przebiegiem wtrysku i spalania oleju pirolitycznego po destylacji – brak prac naukowych w tym temacie tj. dotyczącym oleju z pirolizy tworzyw sztucznych po destylacji.
2. Zauważalny jest brak literatury naukowej opisującej przebieg wysokociśnieniowego wtrysku oleju pirolitycznego i jego analizę za pomocą średnic średnic Sautera SMD. W pracy przeprowadzono badania wtrysku pod wysokim ciśnieniem przez wtryskiwacz do bezpośredniego wtrysku. Badania wykonano na stanowisku Malvern-Spraytech.
3. W pracy przeanalizowano przebieg spalania w komorze o stałej objętości, zachowując niemalże identyczne (wysoce powtarzalne) warunki początkowe ciśnienia, temperatury i składu utleniacza oraz dawki paliwa.

4. Przebieg spalania (wydzielania ciepła w zależności od czasu) obliczono na podstawie przebiegu ciśnienia w komorze podczas spalania przy wykorzystaniu I zasady termodynamiki.
5. Uzyskano bardzo dobrą dokładność pomiarową dla otrzymanych wyników wynikającą z wysokiej klasy sprzętu pomiarowego oraz bardzo dobrą powtarzalność wyników podczas powtórzeń, co świadczy o powtarzalności przebiegu zapłonu i spalania w komorze.
6. Przebieg wtrysku i rozprzestrzeniania się płomienia rejestrowano za pomocą szybkiej kamery cyfrowej o szybkości 20 tys. klatek/s, co umożliwiło wizualizację wtrysku i płomienia, a także obserwację początku zapłonu i powstawania płomienia, co więcej można było wyznaczyć niemalże chwilową prędkość wypływu paliwa z dyszy (zdjęcia wykonywane co 50 μ s).
7. Dokonano prawidłowej interpretacji i oceny materiału zdjęciowego poprzez jego obróbkę i analizę za pomocą własnego programu w środowisku programistycznym Matlab.
8. W pracy wykorzystano analizę porównawczą do porównania ze sobą przebiegu wtrysku i spalania badanego oleju pirolitycznego z paliwami klasycznymi. Otrzymane wyniki odniesiono do liczb kryterialnych Weber i Ohnesorge, które służą do oceny przebiegu wypływu cieczy z dyszy i mechanizmu jej rozpylania.

Doktorantka wykazała się umiejętnością prowadzenia eksperymentu, który zaplanowała, przygotowała stanowiska i wykonała pomiary, podczas których wykorzystywała bardzo nowoczesną aparaturę badawczą. Potrafi także trafnie formułować wnioski szczegółowe i ogólne, wynikające z przeprowadzonych badań. Świadczy to o dużej dojrzałości naukowej Kandydatki. Metodyka badań oraz otrzymane wnioski z badań empirycznych stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autorki.

Zawarte w pracy wyniki badań i analiz wskazują na rzetelność i dociekliwość badawczą Autorki. Przedstawioną do oceny pracę można uznać za oryginalne dzieło o dużym znaczeniu dla rozwoju silników spalinowych, a podjętą w pracy problematykę za aktualną, ciekawą i istotną.

Reasumując, wszystkie wymienione elementy pracy stanowią o jej dużej wartości merytorycznej, a zwłaszcza na uwagę zasługują następujące jej elementy:

- uzasadnienie podjęcia tematu, które wynika z wnikliwej analizy stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i obeznanie z rozważaną tematyką,
- przeprowadzenie badań z wykorzystaniem bardzo nowoczesnej aparatury pomiarowej,
- umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej, w tym pozycji literatury światowej,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cel i zakres.

Autorka w dysertacji podjęła się wyjątkowo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych z wpływem wybranego paliwa (kondensatu pirolitycznego) na proces rozpylenia paliwa i spalania w komorze o stałej objętości, symulującego w pewnym zakresie rzeczywisty silnik spalinowy. Zagadnienie opisywane w pracy jest skomplikowane ze względu na dużą liczbę czynników mających wpływ na badane zjawiska, np. sam sposób podawania wybranego paliwa do cylindra, oraz zmiany jego właściwości jak lepkość, napięcie powierzchniowe, temperatura

zapłonu i samozapłonu, a także liczba oktanowa itp. Trudne jest zdecydowane wydzielenie wpływu jednego czynnika (tzw. analiza pierwiastkowa), ponieważ należy liczyć się z interakcją innych. Należy przy tym zaznaczyć, że obecny stan wiedzy o niektórych czynnikach jest niewystarczający do pełnego ustalenia ich wpływu, stąd też tylko wybrane czynniki należy brać pod uwagę, dając możliwość uzupełnienia ich w dalszej pracy badawczej. Wynika z tego konieczność dalszych badań i analiz, które pozwolą w sposób jednoznaczny określić wpływ wybranego nietypowego paliwa na proces spalania i parametry pracy silnika.

Chciałbym dodatkowo podkreślić, że prace empiryczne mają bardzo istotne znaczenie dla rozwoju nauk technicznych, co nie zawsze znajduje odzwierciedlenie w recenzjach, a ponadto łatwo jest w nich wykazać wiele błędów i niedociągnięć. Zagranicą liczą się przede wszystkim prace empiryczne, a taka jest ta dysertacja, przy czym nakład pracy jest zdecydowanie większy w warunkach krajowych. Przedstawione badania wykonano wykorzystując nowoczesne techniki badawcze, a nakład pracy Autorki był duży i twórczy. Opracowane stanowiska badawcze mogą w przyszłości służyć do realizacji innych prac badawczych i dydaktycznych.

3. PODSUMOWANIE

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

- Autorka dokonała wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały w osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktorantkę, a prezentowane wyniki są uzyskane w poprawnie przeprowadzonych studiach i eksperymentach własnych i mogą służyć do dalszych prac,
- formalny układ pracy jest prawidłowy,
- dysertacja dobrze nawiązuje do aktualnej wiedzy i praktyki, a w wielu elementach wnosi do nich nowe treści,
- znaczna akumulacja należycie ustalonych faktów sprawia, że zostało spełnione kryterium logicznej poprawności pracy.

Powyższe fakty świadczą o kompetencjach Doktorantki w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jej dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria mechaniczna”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Magdaleny Szwaji pt. „Badanie przebiegu tworzenia mieszanki palnej za pomocą wtrysku kondensatu pirolitycznego w komorze o stałej objętości” (promotor: prof. dr hab. inż. Arkadiusz Szymanek) spełnia wymagania pracom doktorskim w myśl Ustawy z dnia 20 lipca 2018 – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz. 85 z późn. zm.) i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony.

Usterki pracy są nieliczne, drugorzędne i nie wpływają na moją bardzo pozytywną ocenę pod względem postawienia problemu badawczego, zrealizowania programu badań doświadczalnych, analizy wyników i napisania przejrzystej rozprawy naukowej. Dlatego stawiam wniosek o wyróżnienie tej pracy, ze względu na:

1. Ważny, aktualny i oryginalny w skali światowej problem badawczy.
2. Wnikliwe przeanalizowanie bardzo złożonego problemu naukowego oceny przydatności badanego paliwa do zastosowania przez silniki spalinowe. Zakres pracy i poziom warsztatu naukowego przewyższa wartości uznawane powszechnie za standardowe.
3. Uzyskanie oryginalnych wyników naukowych o dużych wartościach poznawczych, z perspektywą ich wykorzystania w praktyce w działaniach regulacyjnych dotyczących wprowadzania nowych paliw w silnikach spalinowych, co może przyczynić się do przedłużenia ich egzystencji. W efekcie ponad 1,3 mld samochodów z silnikami spalinowymi (ZI) może zyskać nowe życie na całe dekady. Zdaniem wielu ekspertów w roku 2050 świat nie będzie wyłącznie elektryczny, a technologie będą zróżnicowane.