

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

Poznań, 1.09.2023

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Marca

pt. „Analiza możliwości wykorzystania mieszanin paliw gazowych
o zmiennym składzie do zasilania silników spalinowych”

podstawa opracowania: pismo dr. hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ – Przewodniczącego
Rady Dyscypliny Inżyniera Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej
RDILGT.512.24.2022 z dnia 18.07.2023 r.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Podstawowym czynnikiem decydującym współcześnie nie tylko o sukcesie rynkowym silnika, ale w ogóle o możliwości jego zaistnienia na rynku jest szeroko rozumiana niska szkodliwość dla środowiska naturalnego. Coraz surowsze limity emisji toksycznych składników spalin i zużycia paliwa, a także restrykcyjne wymagania ekologiczne dotyczące całego „cyklu życiowego” silnika (w tym recyklingu) zmuszają konstruktorów do stałego doskonalenia jego konstrukcji oraz materiałów eksploatacyjnych. Czynniki ekologiczne są obecnie najważniejszym stymulatorem rozwoju silników spalinowych. Mimo bardzo dużego postępu, problem oddziaływania silników na środowisko wciąż nie został rozwiązany. Nawet w Kalifornii, która w tym zakresie jest światowym liderem, straty zdrowotne wynikające z ekspozycji ludzi na spaliny silnikowe są nadal wysokie.

Wobec przewidywanego wzrostu liczby pojazdów na świecie oraz zapotrzebowania na paliwa silnikowe można sądzić, że globalna emisja spalin silnikowych będzie nadal wzrastać, a ekologiczna presja wywierana na producentów silników będzie się nasilać. Od dawna dla spełnienia wymagań ekologicznych nie wystarczą już pojedyncze środki, a niezbędne są rozwiązania kompleksowe. Spełnienie przyszłych wymagań ekologicznych wymuszać będzie sięgnięcie po wszelkie dostępne rozwiązania.

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. Szczególnie trudna do opanowania jest nadmierna emisja tlenków azotu w silnikach o zapłonie samoczynnym, badanych w rzeczywistych warunkach eksploatacji, badane w teście RDE (Real Driving Emissions).

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 przevorsowali Niemcy – dozwolone pozostaną te samochody benzynowe, które będą zasilane ekologicznym paliwem, przy produkcji którego odzyskuje się dwutlenek węgla z atmosfery. Zatem uniorny 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 jest rozwiązywany przez dużą liczbę ośrodków naukowych, badawczych i przemysłowych, dysponujących często ogromnymi możliwościami finansowymi. O ważności tego zagadnienia świadczy znaczna liczba publikacji opisujących tę tematykę. To właśnie wyżej wymienionemu zagadnieniu poświęcona jest recenzowana praca, w której Autor opracował, między innymi, metodykę

oceny przydatności mieszanin paliw gazowych (LPG i DME) do zasilania silnika o zapłonie iskrowym. Jeżeli uwzględnić co napisano wyżej – jej tematyka, cel i zakres są wybrane bardzo trafnie.

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

2. OCENA ROZPRAWY

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Pawła Marca liczy 137 stron i składa się z 6 głównych rozdziałów. Ponadto praca zawiera bibliografię obejmującą 66 pozycji, w tym większość obcojęzycznych. Aktualność cytowanej w pracy literatury świadczy o dobrym rozeznaniu Autora w tematyce rozprawy. Podjęcie problemu naukowego zostało poprzedzone analizą stanu wiedzy z zakresu rozważanej tematyki rozprawy i dobrze uzasadnione.

Problemem badawczym było wykazanie, że mieszaniny paliw gazowych mogą pełnić rolę pełnowartościowego paliwa w silnikach ZI, wykorzystywanych do napędu środków transportu.

Dla osiągnięcia tego celu Autor postanowił zrealizować cele cząstkowe, które obejmują (szczegółową technologię realizacji pracy przedstawiono na schemacie blokowym – rys.3.1):

1. Zbadanie wpływu udziału DME w mieszaninie z LPG, na moc silnika.
2. Pomiar zużycia paliwa, przy zasilaniu silnika mieszaninami paliwowymi o zmiennych proporcjach LPG/DME.
3. Analizę zmian ciśnienia indykowanego i granic procesu spalania przy zasilaniu mieszaninami o różnych udziałach składników.
4. Porównanie parametrów dynamicznych pojazdu zasilanego mieszaninami z udziałem DME, w stosunku do wartości osiąganych przy zasilaniu LPG.
5. Określenie możliwości poprawy parametrów użytkowych silnika zasilanego mieszaninami LPG/DME przez korektę kąta wyprzedzenia zapłonu.

Doktorant sformułował także tezę pracy, która bezpośrednio wynika z jej celu, że wykorzystanie DME jako składnika mieszaniny paliwowej z LPG umożliwia utrzymanie parametrów użytkowych silnika na zbliżonym lub wyższym poziomie w pełnym zakresie jego pracy.

Ponadto dołączył hipotezy pomocnicze, w następującej formie:

- Kompensację obniżenia wartości opałowej ładunku można uzyskać przez korektę kąta wyprzedzenia zapłonu.
- Zbliżone właściwości fizykochemiczne LPG i BioDME umożliwiają zastosowanie mieszaniny tych dwóch paliw w istniejących systemach zasilania LPG – aspekt użytkowy.

Niedociągnięcia pracy:

1. Obiekt badań był jednostką od kilku lat będącą już w eksploatacji na rynku motoryzacyjnym, czyli samochód Opel Astra F z silnikiem ZI – X16SZR z pojedynczym wałkiem rozrządu (SOHC), dwoma zaworami na cylinder i wtryskiem jednopunktowym, który spełnia normę Euro 2. Co prawda taki silnik najbardziej nadaje się na przeróbki na paliwa gazowe.
2. Wartościowe byłoby przeprowadzenie analogicznych badań na silnikach spełniających najnowszą normę toksyczności spalin Euro 6. Na obronę Doktoranta można potraktować

taki dobór obiektu badań, wcześniejszej generacji, jako przykład zastosowania tego rozwiązania jako retrofittingu.

3. W pracy zabrakło rozpatrzenia w zasadniczych badaniach bardzo ważnego zagadnienia, jakim jest praca silnika w warunkach dynamicznych, gdyż one są obecnie kluczowe w aspekcie emisji szkodliwych składników spalin i zużycia paliwa. Obecne testy homologacyjne opierają się na pomiarach w warunkach dynamicznych, które są co najmniej kilkukrotnie bardziej uciążliwe od warunków statycznych. Autor odniósł się głównie do oceny pracy silnika w warunkach statycznych, natomiast warunki dynamiczne zostały jedynie uwzględnione w badaniach dynamiki pojazdu. Można było wykonać dla zaproponowanego składu mieszanki LPG i DME badania w teście NEDC (New European Driving Cycle), albo jeszcze lepiej w testach WLTC (Worldwide harmonized Light duty Test Cycle) i RDE (Real Driving Emissions). Taka sugestia znalazła się w kierunkach dalszych badań Autora.
4. 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.
5. W pracy jest brak 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. W eksperymentalnych badaniach parametrów pracy silnika spalinowego wykorzystuje się urządzenia o różnorakiej dokładności pomiarowej, zależnej m.in. od przyjętej metody pomiaru. Oszacowanie niepewności pomiarowej w odniesieniu do zmierzonych przez Autora wielkości z pewnością stanowiłoby cenną informację i podniosło wartość merytoryczną ocenianej pracy.

Powyższe uwagi, częściowo o charakterze dyskusyjnym, mogą być inspiracją do dalszych badań Doktoranta lub do kontynuowania tej tematyki przez innych doktorantów Promotora. Ponadto recenzent zdaje sobie sprawę z ograniczeń sprzętowych i finansowych Doktoranta.

Uwagi szczegółowe:

1. Przy analizie literatury Doktorant skupił się na badaniach dwóch zespołów autorów, pod kierownictwem: Changwei Ji i Seokhwan Lee. Nie bardzo wierzę, że nie robiono takich badań w innych ośrodkach.
2. Autor nie wyjaśnił na jakiej podstawie wybrał do badań wartości prędkości obrotowych (brak badań na prędkości biegu jałowego), obciążeń (brak dla wartości 0% obciążenia) oraz stężeń DME.
3. Powinno być układ wylotowy a nie wydechowy.
4. Program EnComAn jest autorski – to dlaczego jest w języku angielskim – rys. 4.20–4.22?; należało chociażby oznaczenia wyjaśnić w oddzielnej tablicy; w związku z tym błędny zapis ułamków dziesiętnych (w języku polskim obowiązuje przecinek – nie kropka).
5. Czemu Autor zajmował się stężeniem spalin a nie emisją. Co oznaczają: „...umożliwił monitorowanie stężeń węglowodorów, tlenków węgla ???, dwutlenków węgla ???, tlenków azotu oraz tlenu.

Uwagi edytorskie: 12 i 11.17.

1. Na rysunku 1.2 – opis w języku angielskim.
2. Cytowanie literatury nie może być po kropce na końcu zdania, czyli „...LPG.[4]”
3. Literatura nie powinna być jako numer rozdziału (7. Literatura).
4. Tekst „wiszący”, czyli tekst pomiędzy podrozdziałami 4.1 → 4.1.1.
5. Złe formatowanie, puste miejsca na stronach, podpisy pod rysunkiem bywają na następnej stronie.
6. Zdarzają się błędne zapisy (rys. 5.2.) a powinno być (rys. 5.2) oraz kopki na końcu podpisu pod rysunkami.

Osiągnięcia pracy:

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

Osiągnięciem pracy jest oryginalne i twórcze podejście do opracowania prawidłowej metodyki badawczej na poziomie sprzętowym będącym w dyspozycji Doktoranta, która umożliwia ocenę przydatności mieszaniny paliw LPG z DME do zastosowania w silniku spalinowym o zapłonie iskrowym. Zaproponowaną metodykę można wykorzystać jako wieloparametrową analizę przydatności innych badanych paliw. Tak więc opracowana metodyka może służyć do oceny przydatności innych konfiguracji paliw w zastosowaniu dla silników spalinowych.

Ponadto na podkreślenie zasługują następujące walory pracy:

1. Osiągnięto zamierzony cel pracy, gdyż wykazano, że mieszaniny paliw gazowych mogą pełnić rolę pełnowartościowego paliwa do napędu środków transportu.
2. Wykorzystanie DME jako składnika mieszaniny paliwowej z LPG umożliwia utrzymanie parametrów użytkowych silnika na zbliżonym lub wyższym poziomie w pełnym zakresie jego pracy, a parametry silnika pojazdu (a także pojazdu) zasilanego mieszaniną LPG+DME są zbliżone, a w niektórych obszarach osiągają wyższe wartości w stosunku do zasilania paliwem referencyjnym LPG.
3. Istnieje możliwość zasilania silnika ZI mieszaniną paliw gazowych LPG+DME do 30% udziału masowego DME z zachowaniem pełnej kontroli nad zachodzącym procesem spalania w silniku.
4. Zwiększenie kąta wyprzedzenia zapłonu w zakresie 3°- 6° w porównaniu do oryginalnej mapy sterownika instalacji gazowej poprawia parametry silnika (pojazdu).
5. Skonstruowane autorskie urządzenia/stanowiska do wytwarzania mieszanin, zapewnia precyzyjne ustalanie składu mieszaniny paliwowej, a także umożliwia wytwarzanie dowolnych mieszanin paliw, także do badań mieszanin z wodorem.
6. Opracowanie autorskiego systemu wyznaczającego kąt uchylenia przepustnicy, polegający na wykonaniu ogranicznika pedału przyspieszenia.
7. Bardzo szczegółowe badania indykatorowe w funkcji założonych parametrów regulacyjnych.
8. Zbliżone właściwości fizykochemiczne LPG i DME umożliwiają zastosowanie mieszaniny tych dwóch paliw w istniejących systemach zasilania LPG.

Doktorant wykazał się umiejętnością prowadzenia eksperymentu, który zaplanował, przygotował stanowiska i wykonał pomiary, podczas których wykorzystywał dostępną aparaturę badawczą. Potrafi także trafnie formułować wnioski ogólne, szczegółowe, metodyczne, użytkowe i perspektywiczne, wynikające z przeprowadzonych badań. Świadczy to o dużej dojrzałości naukowej Kandydata. Metodyka badań oraz otrzymane wnioski z badań empirycznych stanowią w znacznej części oryginalny wkład Autora.

Zawarte w pracy wyniki badań i analiz wskazują na rzetelność i dociekliwość badawczą Autora. 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 opanowanie 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.

Autor w dysertacji podjął się wyjątkowo trudnego i ambitnego zadania, które z oczywistych względów nie wyczerpuje całości zagadnień związanych z analizą możliwości zastosowania mieszanin paliw gazowych (LPG + DME) do zasilania silnika o zapłonie iskrowym. Zagadnienie opisywane w pracy jest skomplikowane ze względu na dużą liczbę czynników mających wpływ na badane zjawiska. 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 Doktoranta. Wynika z tego konieczność dalszych badań i analiz, które pozwolą w sposób jednoznaczny określić wpływ tego typu zasilania na proces spalania i parametry pracy silnika o zapłonie iskrowym.

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 Autora 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:

- Autor dokonał wyjątkowo trafnego wyboru tematyki swojej pracy, a jej zakres spełnia stawiane wymagania,
- zasadnicze cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Doktoranta, 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 Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na Jego dużą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport”, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą.

Stwierdzam zatem, że praca mgr inż. Pawła Marca pt. „Analiza możliwości wykorzystania mieszanin paliw gazowych o zmiennym składzie do zasilania silników spalinowych” (promotor: dr hab. inż. Grzegorz Kubica, prof. PŚ; promotor pomocniczy: dr inż. Monika Andrych-Zalewska) spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14 marca 2003 roku, i stawiam wniosek do Rady Dyscypliny Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu o przyjęcie rozprawy i o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

