

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Sidorowicz**

**pt.: Identyfikacja systemu tworzenia ładunku i spalania z dwupaliwowym układem zasilania z wtryskiem bezpośrednim**

### **1. WSTĘP**

Podstawa opracowania recenzji: pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Poznańskiej nr DR-63/557/1/2020 z dnia 28.09.2020 r. Pana prof. dr. hab. inż. Jacka PIELECHY. Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Sidorowicz pt. „Identyfikacja systemu tworzenia ładunku i spalania z dwupaliwowym układem zasilania z wtryskiem bezpośrednim”, wykonana pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Ireneusza PIELECHY z Wydziału Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Sidorowicz została przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria lądowa i transport.

### **2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY**

Ciągły rozwój transport drogowego, a w szczególności układów napędowych oraz stałe zagrożenie środowiska naturalnego, rosnące wraz ze wzrostem liczby eksploatowanych silników spalinowych, zmusza do poszukiwania, z jednej strony rozwiązań ograniczających ich szkodliwe oddziaływanie na otoczenia, z drugiej zaś poszukiwania technik w obszarze nowych sposobów napędu pojazdów samochodowych.

Silniki spalinowe, zasilane paliwami węglowodorowymi pochodzącymi ze źródeł kopalnych, są obecnie podstawową jednostką napędową pojazdów samochodowych. Pomimo

rosnącej liczby pojazdów napędzanych silnikami elektrycznymi, nie wydaje się, aby w krótkim czasie zastąpiły one samochody z „klasycznymi” jednostkami napędowymi. Pozostaje bowiem kwestia, zwłaszcza bardzo aktualna w Polsce, produkcji energii elektrycznej, a zwłaszcza paliw używanych do jej wytwarzania.

Zwiększenie świadomości ekologicznej użytkowników pojazdów, związane m.in. z globalnym ociepleniu oraz tzw. „afērą dieslową” spowodowało zwiększenie zainteresowania silnikami o zapłonie iskrowym. Poszukiwanie kompromisu pomiędzy zużyciem paliwa a spełnieniem norm emisji szkodliwych związków w spalinach, spowodowało działania w czterech obszarach: downsizingu, downspeedingu, rightsizingiem oraz zastosowania paliw innych niż benzyna i olej napędowy (tzw. „alternatywnych”).

Rozprawa liczy 113 stron tekstu, obejmującego dziewięć rozdziałów (w tym wprowadzenie i wnioski), streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis oznaczeń. Literatura zestawiona na str. 105 – 112 stanowi 125 dobrze i wyczerpująco dobranych pozycji (w tym dwie Doktoranta).

Tematyka podjęta przez Doktoranta jest aktualna i spełnia warunki znamion oryginalnego problemu naukowego, do którego rozwiązania jest niezbędna ogólna wiedza teoretyczna i praktyczna Kandydata w dyscyplinie naukowej „Inżynieria lądowa i transport” i wymaga umiejętności samodzielnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematu rozprawy. Nakreślono tu ogólnie cel pracy oraz kwestie związane z obecną sytuacją rozwoju układów napędowych pojazdów. Przedstawiono rozwiązania układów wtrysku bezpośredniego benzyny i jego wpływ na sposób tworzenia ładunku w cylindrze.

Rozdział drugi zawiera opis tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz jej spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. Przedstawiono w nim proces tworzenia ładunku w zależności od sposobu doprowadzenia paliwa: bezpośredniego lub pośredniego wtrysku paliwa. Na podstawie przeglądu literatury zaprezentowano rozwiązania dwupaliwowych układów wtrysku paliwa oraz sposoby kształtowania mieszanki paliwowo-powietrznej, dla których jako podstawowy wskaźnik przyjęto współczynnik nadmiaru powietrza

Rozdział trzeci zawiera cel i zakres dysertacji, oraz tezę naukową, o następującej treści:

**„Zastosowanie bezpośredniego wtrysku dwóch paliw do cylindra przed zapłonem, pozwala na zwiększenie możliwości sterowania procesami przygotowania i spalania ładunku uwarstwionego w silniku o zapłonie iskrowym”.**

Celem pracy było ilościowe określenie przyjętych przez Autora trzech wskaźników oceny, w wyniku czego miało nastąpić „potwierdzenie lub obalenie tezy naukowej”.

Przedstawione w tym rozdziale zadania badawcze zapewniają czytelnikowi łatwość śledzenia dalszej części pracy.

Rozdział piąty stanowi opis sposobu rozwiązania zadania badawczego. Scharakteryzowano w nim wybrane przez Autora metody badawcze, służące osiągnięciu założonego w pracy celu naukowego, oraz obiekty badawcze i aparaturę pomiarową.

W rozdziale szóstym opisano badania symulacyjne z wykorzystaniem programu AVL Fire 2019.2, które pozwoliły na przeprowadzenie symulacji cyfrowej procesu rozpylenia paliwa i spalania, przy zastosowaniu wtrysku bezpośredniego z dwóch wtryskiwaczy i czterech rodzajów paliwa.

W rozdziale siódmym i ósmym przedstawiono wyniki badań empiryczne na stanowiskach badawczych.

Badania opisane w rozdziale siódmym miały na celu przeprowadzenie analizy wskaźników geometrycznych strugi paliwa. Badania rozpylenia paliwa zostały wykonane z wykorzystaniem metody optycznej w komorze o stałej objętości. Pozwoliły one na zmierzenie takich wskaźników opisujących właściwości rozpylenia paliwa jak: zasięg strugi, szerokość strugi, pola powierzchni przekroju strugi i prędkość strugi. Badania przeprowadzono dla czterech rodzajów paliwa: benzyny, etanolu, n-heptanu i n-butanolu.

Rozdział ósmy jest poświęcony badaniom procesu spalania mieszanek paliw z wykorzystaniem maszyny pojedynczego cyklu. Podczas tych badań wykonano badania optyczne i indykatorowe, które pozwoliły m.in. na uzyskanie przebiegów zmian ciśnienia w cylindrze co pozwoliło na obliczenie średnich wartości szybkości narastania ciśnienia oraz szybkości wywiązywania ciepła w komorze spalania.

Rozprawę zamyka podsumowanie, zawierające syntetycznie ujęte wnioski, które korespondują bezpośrednio z celem przeprowadzonych analiz i badań.

Układ pracy uważam za właściwy dla rozpraw doktorskich. W pracy wyraźnie wyodrębniono elementy opisu stanu wiedzy związanej z tematem rozprawy oraz elementy własnego wkładu Autora w rozwiązanie postawionego sobie zadania naukowego. W pracy został sprecyzowany cel naukowy, przedstawiono metodykę badań, ich wyniki, analizę tych wyników a także sformułowano oryginalne wnioski.

### 3. OCENA ROZPRAWY

Pod względem merytorycznym i metodycznym oceniam recenzowaną pracę wysoko, co nie oznacza, że praca nie posiada błędów i usterek, które zostaną szerzej omówione w części dotyczącej uwag szczegółowych, gdyż nie rzutują na ogólną ocenę pracy.

Układ logiczny treści rozprawy, odpowiadający tokowi prowadzonych analiz i badań, jest prawidłowym metodycznie ciągiem czynności badawczych, powodującym, że układ treści jest przejrzysty, bez powtórzeń i luk.

Uważam, że cele pracy zostały osiągnięte, a uzyskane wyniki mają dużą wartość zarówno poznawczą, jak i praktyczną.

Na szczególne wyróżnienie, upoważniające mnie do takiej oceny rozprawy, zasługują następujące elementy:

1. Podjęcie aktualnej ze względów teoretycznych i praktycznych tematyki oraz rozwiązanie tego trudnego zadania.
2. Biegła znajomość i sprawne zastosowanie zaawansowanych metod numerycznych do realizacji postawionych sobie zadań.
3. Sposób doboru paliw dodatkowych (innych niż benzyna), dla których przeprowadzono badania symulacyjne i empiryczne.
4. Wykorzystanie badań symulacyjnych do doboru położenia wtryskiwaczy w głowicy eksperymentalnego układu badawczego, z uwzględnieniem zarówno odległości końcówki wtryskiwacza względem jej dolnej krawędzi, kąta nachylenia jak i położenia względem świecy zapłonowej.
5. Połączenie lokalnych wskaźników procesu spalania (np. promienia płomienia) ze wskaźnikami globalnymi (np. szybkość wywiązywania ciepła).

Mam również uwagi krytyczne, niekiedy o charakterze dyskusyjnym, a także zapytania w sprawach nie do końca dla mnie jasnych:

1. Część teoretyczna stanowi bardzo bogaty zbiór aktualnych informacji literaturowych związanych z tematem pracy, brakuje jednak, tak ważnej w pracach naukowych, krytycznej analizy ich treści.
2. Stosowanie w ramach jednego podrozdziału w zależności od tematyki fragmentów pełnych nazw lub skrótowców (np. olej napędowy i ON), powoduje wrażenie, że Autor

„skleił” treści pochodzące z różnych źródeł literaturowych, nie zwracając szczególnej uwagi na edycję tekstu.

3. Badania wykonano w sekwencji benzyna + paliwo dodatkowe. Ciekawa byłaby analiza kombinacji tylko paliw dodatkowych. Dlaczego takich badań nie przeprowadzono?
4. Skromna analiza strugi paliwa z wykorzystaniem oświetlenia laserowego.
5. Brak analizy rozkładu temperatury w komorze spalania – mogłoby to w znaczny sposób zwiększyć jakość dalszych analiz.
6. Brak analizy emisji spalin dla poszczególnych rodzajów paliw w badanym układzie spalania.
7. Brak weryfikacji wyników badań na obiekcie rzeczywistym – czterosuwowym silniku spalinowym o zapłonie iskrowym z bezpośrednim wtryskiem paliwa.

#### 4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Jak wcześniej wspomniałem, uwagi te w żadnym stopniu nie obniżają mojej oceny ogólnej, wysokiej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru i sformułowania tematu, uzasadnienia, analiz, badań i wnioskowania). Są to w większości typowe potknięcia spotykane w pracach naukowych i formułuję je w celu skłonienia Autora do dodatkowych przemyśleń oraz doskonalenia warsztatu naukowego i pisarskiego.

1. Mylenie pojęć „wielkość” i „wartość”, np. na str. 2, a także 20, tytuł podrozdziału 2.4 „Sterowanie wielkością współczynnika nadmiaru powietrza ...” – współczynnik nadmiaru powietrza jest wielkością a zmieniać można jego wartość, czy też na str. 12, 11 wg. – „wielkość masy”;
2. Używanie jednostki mililitr zamiast centymetr sześcienny;
3. Niewłaściwe używanie terminu „przebieg”, a tym bardziej „przebieg szerokości strugi”;
4. Niewłaściwe używanie terminu „system” zamiast „układ”, zwłaszcza w przypadku układu wtryskowego;
5. Błędne używanie kropki w zapisie liczb dziesiętnych;
6. Używanie zamiennie określeń: „mieszanka”, „mieszanina” i „ładunek”;
7. Używanie żargonu, np. „masa wtrysku paliwa”, „w suwie sprężania”, „zwiększenie wyprzedzenia wtrysku”, „ benzyna podawana w suwie”, itp.

8. Używanie określenia „silnik o ZS” lub „silnik spalinowy o ZI”. Poprawnie należy zapisać „silnik spalinowy o zapłonie samoczynnym/iskrowym” lub, jeśli chcemy wzorować się na literaturze anglojęzycznej „silnik ZI” lub „silnik ZS (od ang. *SI engine* i *CI engine*);
9. Str. 4, 15 wg., stwierdzenie „Posłużono się metodyką maksymalizująca...emisji spalin” jest raczej sprzeczne z celem pracy. Powinno być chyba „... oraz minimalizujące emisję spalin”;
10. Str. 6, w wykazie ważniejszych skrótów, oznaczeń i indeksów znajdują się skrótownice BMEP, CoV i IMEP. Jaki jest cel przedstawienia tych skrótownic, skoro w tekście, np. na str. 20 w zapisie CoV(IMEP) sprawiają wrażenie, jakby Autor nie potrafił do końca przetłumaczyć tekstu, natomiast na związanym z tym tekstem rysunkiem 2.15 b znajduje się już zapis CoV( $p_i$ ). Ponadto współczynnik zmienności oznacza się literą  $V$  i oblicza za pomocą równania:

$$V = \frac{s}{\bar{x}}$$

gdzie:  $s$  – odchylenie standardowe;

$\bar{x}$  – średnia arytmetyczna wartości zmiennej.

11. Str. 9, 6 wg., proszę wyjaśnić pojęcie „niezawodność procesu spalania”;
12. Str. 9, 14 wd., proszę wyjaśnić pojęcie „kontrolowanie mieszanki”;
13. Str. 10, 3 wg, może lepiej zamiast „sztucznie wytworzone ciekłe paliwa” (co wygląda jak wynik tłumaczenia słabej jakości tłumacza) użyć zwrotu „paliwa syntetyczne”;
14. Str. 11, 3 wd., jeśli podajemy zakres wartości, to z reguły najpierw podajemy wartość mniejszą a następnie większą;
15. Str. 12, 6wg., proszę wyjaśnić pojęcie „przebywanie paliwa z powietrzem”, lub jak na str. 14 – „przebywanie powietrza z paliwem”;
16. Str. 14, 3wd., użycie terminu „pojemności skokowej” zamiast „objętość skokowa”;
17. Str. 15, 4 wg., proszę wyjaśnić, która wartość temperatury jest właściwa: „2000K” czy jak na rysunku 2.8 – 2000°C?
18. Str.17, pierwszy akapit od góry dotyczący wtrysku wodoru brzmi jak przypadkowe wtrącenie, ponieważ Autor cały czas zajmuje się paliwami ciekłymi i umieszcza tą treść bez żadnego wprowadzenia;
19. Str.18, 16 wg., „silnik wysokoprężny o zapłonie samoczynnym” to pleonazm. Poza tym nie używa się obecnie pojęcia „silnik wysokoprężny”;
20. Str. 21, 1 wg., Konkluzją tych badań był m.in. wniosek” – j.w.;

21. Str. 21, 3 wg., proszę wyjaśnić pojęcie „jakość misji spalin”;
22. Str. 23 i 24, w jakim celu autor wyjaśnia znaczenie skrótowców i ich angielskie rozwinięcia (np. „wtrysku bezpośredniego etanolu (EDI – *ethanol direct injection*)”), skoro zostały opisane w spisie skrótów i oznaczeń?
23. Str. 24, rys. 2.20, czy „masowy udział benzyny” (na rysunku) i „masa benzyny” (w podpisie rysunku) to na pewno te same wielkości?
24. Str. 25, 10 wd., pojęcie „nieosiowy montaż” to błąd technologii montażu, w tym przypadku raczej chodzi o „przesunięcie wtryskiwacza względem osi cylindra”;
25. Str. 28, Autor stawia **tezę** naukową, a następnie pisze o „potwierdzeniu lub obaleniu tezy naukowej”. Potwierdzić lub obalić można **hipotezę**, teza to twierdzenie, które **należy udowodnić**. Dla tego bezpieczniej było by użyć pojęcia „hipoteza badawcza”. Zresztą sam Autor chyba nie zna różnicy tych pojęć, ponieważ na str.85 pisze, że „Badania eksperymentalne spalania mają na celu ostateczne potwierdzenie **zalożonej hipotezy badawczej...**”;
26. Str. 31, 24 wd., „Wypadkowa wartość  $\lambda$ ” – współczynnik nadmiaru powietrza  $\lambda$  nie jest wielkością wektorową, więc nie może posiadać wartości wypadkowej! Podobnie na str. 33 i 34.
27. Str. 31, ostatni akapit – Autor użył bardzo nietypowego dla prac naukowych opisu uzasadnienia sposobu doboru paliwa: „doboru paliw dokonano na podstawie analizy artykułów w bazie publikacji Elsevier opublikowanych od ... do...” i dalej „Określono liczbę publikacji innych paliw użytych do badań”. Czy to oznacza, że doboru paliw dokonano na podstawie liczby publikacji a nie merytorycznej analizy ich treści?
28. Str. 36, 4 wg., badania stanowiskowe nie są rodzajem „metod modelowych”, lecz metod badawczych;
29. Str. 37, tab. 5.1, w tabeli wartość początku wtrysku paliwa wynosi 680°OWK przed GMP (początek zapłonu – 690°OWK przed GMP). Zasadniczo pełen cykl pracy silnika czterosuwowego wynosi 720°OWK. Autor, jako naukowiec, nie powinien przepisywać wskazań urządzenia pomiarowego, lecz je analizować i zapisywać zgodnie z przyjętymi zasadami;
30. Str. 43, 1 wg, zamiast „prędkość” (w obu przypadkach) powinna być „szybkość”. Zużycie paliwa (w odróżnieniu od przepływu paliwa) oraz reakcje chemiczne są skalarne;

31. Str. 47 i 48, rys. 5.8 – 5.11 nie przedstawiają przekroju silnika a jedynie głowicy.  
Ponadto prawidłowy zapis wartości kąta powinien być „13<sup>o</sup>” a nie „13 deg”.
32. Str. 52, 3 wd., powinno być „10kHz” a nie „10000 Hz”;
33. Str.57, 18wg., proces dolotu i sprężania stanowią połowę cyklu pracy silnika czterosuwowego, a nie jak pisze Autor „trzy czwarte cyklu pracy”;
34. Str. 61, rys. 6.6, proszę wyjaśnić pojęcie „zmiana kątowna stężenia”;
35. Str. 71, 5 wd., proszę wyjaśnić pojęcia „technologie silnikowe” i „warunki eksperymentalne”
36. Str. 82, 5 wg., powinno być „Wariancja” a nie „Wariacja”;
37. Str. 84, 2 wd., w równaniu Clapeyrona temperatura wyrażana jest w Kelwinach (K), a nie stopniach Celsjusza!
38. Str. 102, 14 wg., powinno być „ symulacji procesów” a nie „procesów symulacyjnych”;
39. Str. 103, 4 wg., Autor nie przeprowadził wielokryterialnej analizy wskaźników tylko pseudooptrymalizację (str. 65 – 66). W przypadku analizy wielokryterialnej konieczne jest zdefiniowanie zmiennych decyzyjnych, zakresu dopuszczalnych zmian ich wartości oraz funkcji celu. Pseudooptrymalizacja polega na znalezieniu dopuszczalnych rozwiązań dla każdego wskaźnika oddzielnie, a następnie określenie rozwiązania optrymalnego – co zostało przedstawione w pracy.

## 5. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że:

- Autor dokonał trafnego wyboru tematyki swojej pracy;
- Cel pracy został osiągnięty a słuszność jej tezy została potwierdzona badaniami;
- Formalno-redakcyjny układ rozprawy jest dobry;
- Praca dobrze konweniuje ze stanem teorii i rzeczywistymi kierunkami rozwoju silników o zapłonie iskrowym;
- Rozprawa spełnia kryterium logicznej poprawności.

W moim przekonaniu fakty te świadczą o wystarczających kompetencjach Doktoranta w zakresie samodzielnego prowadzenia badań naukowych.



W związku z powyższym uważam, że rozprawa mgr. inż. Macieja Sidorowicz pt. „Identyfikacja systemu tworzenia ładunku i spalania z dwupaliwowym układem zasilania z wtryskiem bezpośrednim” (promotor: prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha) **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** 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 2003r., 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 mgr inż. Maciej Sidorowicz może być dopuszczony do jej publicznej obrony.**

