

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Rodaka

pt. „Wpływ parametrów tworzenia mieszanki wodorowo-powietrznej na przebieg procesu spalania w silniku z zapłonem iskrowym”

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej z dnia 28.02.2022 r.

1. Charakterystyka i ocena ogólna rozprawy

Rozprawa ma charakter numeryczno-eksperymentalny i ma objętość 100 stron. Praca zawiera 12 rozdziałów i streszczenie w języku angielskim i polskim, wykaz symboli, skrótów i oznaczeń, spis tabel i rysunków oraz bibliografię (65 pozycji). Rozprawa zawiera 8 tabel i 56 rysunków. Struktura pracy jest prawidłowa z właściwym podziałem na rozdziały i podrozdziały. Praca zawiera wszystkie niezbędne elementy charakterystyczne dla pracy doktorskiej. Rozprawa jest napisana poprawnym językiem, z czytelnym formatowaniem.

Rozdział 1 to wstęp rozprawy, który pełni funkcję wprowadzenia do tematyki podjętej w pracy, nakreśla powagę problemu emisji CO₂ jako zagrożenia dla klimatu Ziemi, a także wskazuje na potrzebę większego wykorzystania wodoru jako paliwa, zarówno w energetyce jak i w transporcie.

Rozdział 2 to kolejne wprowadzenie, tym razem skoncentrowane na krótkim omówieniu właściwości wodoru, metod jego wytwarzania oraz wskazanie na możliwości wykorzystania w ogniwach paliwowych i silnikach spalinowych.

W rozdziale 3 autor dokonał krótkiego przeglądu prac badawczych dotyczących zastosowania wodoru do napędu silników tłokowych, z przypomnieniem prac prowadzonych w Politechnice Krakowskiej oraz zastosowań wykorzystujących ogniwa paliwowe.

Rozdział 4 zawiera syntetyczne omówienie systemów zasilania i spalania silników tłokowych o zapłonie iskrowym z mieszanką paliwowo-powietrzną jednorodną i uwarstwioną.

W rozdziale 5 autor omówił systemy zasilania wtryskowego wodorem tłokowych silników spalinowych, pośredni do kanału dolotowego i bezpośredni do cylindra. W podsumowaniu rozdziału autor wskazał na istotne wady tych systemów, między innymi na zbyt małą ilość dostarczonego wodoru, dającą w wyniku tego małą moc jednostkową.

Większe ilości wodoru powodują z kolei zbyt duże szybkości narastania ciśnienia i niepożądany przebieg spalania.

Rozdział 6 poświęcony jest przedstawieniu celu naukowego i użytecznego pracy, planu realizacji pracy oraz tezy dysertacji. Doktorant sformułował tezę i nakreślił plan prac badawczych prowadzących do udowodnienia słuszności tej tezy. Nakreślone cele pracy są czytelne i oryginalne oraz wynikają logicznie z przeprowadzonego przeglądu stanu wiedzy.

W rozdziale 7 autor omówił rodzaje procesów spalania w silnikach tłokowych (deflagracyjne, detonacyjne i stukowe) oraz porównał procesy spalania mieszanek benzyny, metanu i wodoru z powietrzem w silnikach tłokowych.

Rozdział 8 omawia wyniki badań symulacyjnych wtrysku i spalania wodoru w komorze izochorycznej, wykonanych przy użyciu kodu KIVA 3V. Obliczenia numeryczne wykonano dla prostej walcowej geometrii 3D dla trzech przypadków: wtrysku całej dawki wodoru przed zapłonem iskrowym, wtrysku dzielonego na 2 części (przed i po zapłonie w 30 ms od początku wtrysku) oraz wtrysku dzielonego na 2 części (przed i po zapłonie w 40 ms od początku wtrysku).

Rozdział 9 zawiera opis metodyki i wyników badań doświadczalnych wtrysku i spalania wodoru w komorze izochorycznej. Badania przeprowadzono dla tych samych przypadków strategii wtrysku wodoru jak w symulacjach opisanych w rozdziale 8. W badaniach mierzono zmiany ciśnienia w czasie w komorze w trakcie wtrysku i spalania wodoru oraz bezpośrednio filmowano szybką kamerą przebieg procesu.

Rozdział 10 omawia wyniki badań symulacyjnych procesu wtrysku i spalania wodoru w modelu 3D silnika tłokowego, wykonanych przy użyciu kodu KIVA 3V. Model silnika odpowiadał geometrycznie silnikowi badawczemu, wykorzystanemu w badaniach doświadczalnych opisanych w rozdziale 11. Obliczenia numeryczne wykonano dla przypadku wtrysku wodoru do kanału dolotowego i wtrysku bezpośredniego wodoru do cylindra z zapłonem iskrowym na 11° kąta obrotu wału korbowego przed zakończeniem wtrysku. W wyniku obliczeń otrzymano przebieg ciśnienia, temperatury, masy wodoru, ciepła wydzielonego i szybkości wydzielania ciepła w cylindrze w funkcji kąta obrotu wału korbowego.

W najobszerniejszym rozdziale 11 przedstawiono badania doświadczalne wykonane na badawczym silniku tłokowym. Autor opisał szczegółowo stanowisko badawcze i aparaturę pomiarową, metodykę badań oraz wyniki badań dla przypadku wtrysku wodoru do kanału dolotowego i wtrysku wodoru bezpośrednio do cylindra. W badaniach mierzono przebieg ciśnienia w cylindrze, moment obrotowy, jednostkowe zużycie paliwa i pośrednio współczynnik nadmiaru powietrza. Badania wykonano przy stałej prędkości obrotowej silnika dla trzech ustawień przepustnicy.

Rozdział 12 to syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników, wskazanie zrealizowanych celów badawczych z odniesieniem się do tezy pracy oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Ostatnie elementy pracy to spis tabel i rysunków oraz spis literatury wykorzystanej w rozprawie. Dobór źródeł jest poprawny.

Podsumowując, oceniam przyjęty układ rozprawy jako logiczny i czytelny. Strona edytorska nie budzi większych zastrzeżeń. Strona graficzna jest staranna, rysunki i wykresy są opracowane czytelnie. Dobór pozycji literatury jest odpowiedni.

2. Wybór tematu rozprawy

Temat rozprawy wybrano bardzo dobrze. Poruszana w dysertacji problematyka zasilania silników tłokowych paliwem wodorowym jest ważna i bardzo aktualna. Wodór, który podczas spalania nie emituje CO₂, CO i cząstek stałych jest od dawna badany jako czysta i ekologiczna alternatywa dla ciekłych i gazowych paliw węglowodorowych stosowanych w silnikach spalinowych. Zachodząca obecnie intensywna elektryfikacja napędów w transporcie odbywa się między innymi z wykorzystaniem ogniw paliwowych zasilanych wodorem. To rozwiązanie jest jednak drogie i wymaga stosowania wodoru o bardzo dużej czystości. Spalanie wodoru w konwencjonalnych silnikach tłokowych, wymagających niewielkich modyfikacji jest rozwiązaniem tańszym i pozwala na wykorzystanie wodoru o dowolnym stanie czystości lub nawet mieszanin wodoru z innymi paliwami.

Dlatego uważam, że podjęte przez doktoranta badania modelowe i doświadczalne nad zastosowaniem wodoru do zasilania silników tłokowych są ważne, ciekawe i wpisujące się w aktualne trendy prac badawczych i rozwojowych. Większość dotychczasowych badań silników zasilanych wodorem dotyczyło silników o zapłonie iskrowym z wtryskiem wodoru do kanału dolotowego. Przy większych obciążeniach w silnikach tych obserwowano przedwczesny zapłon, cofanie się płomienia do kanału dolotowego i spalanie stukowe. W przypadku bardzo ubogich ładunków ($\lambda > 3$) uzyskiwano niską emisję tlenków azotu, ale także dużą ilość niespalonego wodoru. Ponadto moc silników wodorowych była ponad 30% niższa niż benzynowych. Z tego powodu tego typu rozwiązanie może być stosowane tylko w bardzo ograniczonym zakresie. Rozwiązaniem poprawiającym zarówno spalanie jak i osiągi silnika jest bezpośredni wtrysk wodoru do cylindra z samozapłonem wodoru w silniku ZS lub z zapłonem iskrowym w silniku ZI.

Autor zaproponował i przebadał koncepcję wtrysku bezpośredniego dawki wodoru do komory spalania podzielonej na dwie części, pierwszej podczas procesu sprężania i drugiej po zapłonie iskrowym podczas spalania. Nienazwaną tezą pracy jest stwierdzenie, że rozwiązanie to pozwala na osiągnięcie w komorze spalania globalnego stechiometrycznego składu ładunku wodorowo-powietrznego i tym samym wydzielanie większej ilości ciepła i

osiągnięcie większej mocy jednostkowej. Celem praktycznym pracy było opracowanie elektronicznego sterownika bezpośredniego zasilania wtryskowego wodorem silnika tłokowego.

Biorąc powyższe pod uwagę uważam wybór tematu recenzowanej rozprawy doktorskiej za trafny, aktualny i innowacyjny. Wiedza i doświadczenia zebrane w trakcie prac nad rozprawą mogą zaowocować rozwiązaniami praktycznymi.

3. Ocena metodologiczna pracy

Zamierzony przez autora cel rozprawy wymagał zaprojektowania planu badań w komorze izochorycznej i w silniku badawczym, użycia złożonych stanowisk laboratoryjnych, przeprowadzenia licznych zaawansowanych badań modelowych i silnikowych oraz przeanalizowania i opracowania wyników. Cel eksperymentalny został w pełni osiągnięty i uzyskane wyniki doświadczalne stanowią wartościowy i oryginalny dorobek naukowy autora.

Praca zawiera także zaawansowane symulacje numeryczne procesów wtrysku i spalania w walcowej komorze izochorycznej i w modelowej komorze spalania silnika.

Plan realizacji badań został prawidłowo opracowany. Poszczególne części składowe pracy zostały zaprezentowane w sposób logiczny i czytelny. Zarówno analiza poszczególnych problemów jak i wyciągane wnioski są prawidłowe. Praca jest bogato ilustrowana, co podnosi jej wartość poznawczą i redakcyjną.

Uzyskane wyniki potwierdzają przyjętą tezę pracy, że zastosowanie zasilania wtryskowego z podziałem dawki wodoru na część dostarczoną podczas sprężania i część dostarczoną po zapłonie iskrowym poszerza pola pracy silnika oraz pozwala na uzyskanie korzystniejszych wartości parametrów roboczych.

Praca dostarcza szeregu wartościowych, oryginalnych wyników pomiarowych i interpretacji zjawisk, będących rezultatem solidnej i wytrwałej pracy naukowej. Autor zastosował standardowe, ale odpowiednie metody badawcze, i wydaje się, że wydobyl wszystkie informacje zawarte w wynikach. Dyskusja wyników jest pogłębiona i poprawna.

Oceniam pozytywnie postawienie problemu badawczego, metodologię przeprowadzonych badań oraz analizę i interpretację ich wyników. Rozprawa oprócz walorów naukowych ma dużą wartość praktyczną.

4. Uwagi merytoryczne

Oceniana rozprawa doktorska jest oryginalna i wartościowa merytorycznie ze względu na wnikliwą analizę ważnego zagadnienia wykorzystania wodoru do zasilania silnika tłokowego. W mojej opinii największą wartość naukową mają:

- analiza numeryczna i doświadczalna zasilania silnika według zaproponowanej oryginalnej strategii dzielonego bezpośredniego wtrysku wodoru, przeprowadzona najpierw w komorze izochorycznej o prostej geometrii walcowej, a następnie w silniku badawczym
- sformułowanie wniosków i wytycznych umożliwiających podjęcie dalszych prac aplikacyjnych wykorzystania wodoru w silnikach.

Podczas lektury rozprawy pojawiły się uwagi, pytania i wątpliwości, które wymagają wyjaśnienia lub dyskusji:

1. **Tytuł rozprawy** – głównym celem badawczym pracy było zbadanie wpływu dzielonego wtrysku wodoru na spalanie i osiągi silnika tłokowego i to powinno znaleźć się w jej tytule. W obecnym tytule jest mowa o parametrach tworzenia mieszanki. W badaniach silnikowych jedynym parametrem zmiennym wpływającym na tworzenie ładunku wodorowo-powietrznego był stopień otwarcia przepustnicy, a więc tylko jeden parametr, a sprawa mieszanki wodorowo-powietrznej jest omówiona w punkcie 2.
2. **Mieszanka wodorowo-powietrzna** – w tytule i w całej pracy autor stosuje zwrot *mieszanka wodorowo-powietrzna* co w przypadku badanych procesów jest dyskusyjne. O ile przy wtrysku wodoru do kanału dolotowego jest dostatecznie dużo czasu na zmieszanie wodoru z powietrzem i powstanie w miarę jednorodnej mieszanki wodorowo-powietrznej to w przypadku wysokociśnieniowego wtrysku wodoru do powietrza w komorze izochorycznej lub w cylindrze silnika początkowo tworzy się struga gazu, która następnie miesza się z powietrzem. Szkoda, że ten proces mieszania się wodoru z powietrzem nie został w pracy zbadany ponieważ jest kluczowy dla przebiegu spalania. Symulacje numeryczne w komorze izochorycznej i w modelu silnika powinny dostarczyć informacji na ten temat, ale nie zostały zamieszczone w pracy. Przypuszczalnie zachodzi częściowe zmieszanie wodoru z powietrzem ale nie ma na to dowodów. Ponadto, podczas drugiej fazy wtrysku wodoru, po zapłonie iskrowym, jego spalanie następuje prawdopodobnie w płomieniu dyfuzyjnym w miejscu mieszania się wypływającego wodoru z powietrzem. To również można było zbadać w symulacjach numerycznych, ale nie zostało w pracy przedstawione.
3. **Str.11, 4 l.g.** – dane liczbowe o zagospodarowaniu wodoru powinny być poparte podaniem źródła;
4. **Str. 20, 11 l.g.** – wtrysk wielofazowy, lepiej używać zwrotu „wtrysk wielokrotny”;

5. **Str. 20** – brakuje stwierdzenia, że spalanie mieszanek uwarstwionych poprawia sprawność;
6. **Str.26** – spalanie deflagracyjne obejmuje szerokie spektrum prędkości płomienia, od prędkości minimalnej dla płomienia laminarnego, do szybkich płomieni turbulentnych o prędkości granicznej równej prędkości dźwięku w spalinach;
7. **Str. 26, 3 l.d.** – prędkość spalania detonacyjnego dla stechiometrycznych mieszanin gazowo-powietrznych wynosi 1800-2600 m/s. Stwierdzenie „Proces spalania rozwija się w przeciwnym kierunku niż fala uderzeniowa” jest nieprawdziwe.
8. **Str. 27** – pulsacje ciśnienia rejestrowane podczas spalania stukowego, które wzbudzają drgania mechaniczne w silniku powstają w wyniku wielokrotnych odbić fal ciśnieniowych wygenerowanych podczas gwałtownego samozapłonu mieszanki przed płomieniem;
9. **Str. 29, 2 l.d.** – powinno być „prędkość płomienia laminarnego”
10. **Str. 29**, Tabela 7.1 – brak w wykazie oznaczeń λ_d , λ_g , C_d , C_g
11. **Str. 30** – w opisie symulacji numerycznych w komorze o stałej objętości brakuje informacji o użytym modelu turbulencji i spalania. Brak też informacji o siatce numerycznej i o tym, czy zbadano wpływ wielkości siatki na wyniki. Brakuje zaznaczenia miejsca wtrysku i zapłonu na modelu komory (Rys. 8.1).
12. **Rys. 8.4** – w podpisie należy uściślić czy jest to masa wodoru wtrysniętego w funkcji czasu, czy masa wodoru występującego w komorze
13. **Rys. 8.6, 8.7 i 8.8** – obliczenia są w geometrii 3D, należy podać dla jakiej wysokości walca są te wizualizacje. Wizualizacje rozkładu temperatury nie są najlepszym sposobem pokazania położenia płomienia, najlepszym wskaźnikiem lokalizacji płomienia jest stężenie rodnika OH. Rys. 8.8 wydaje się potwierdzać, że spalanie wodoru następuje w płomieniu dyfuzyjnym w trakcie mieszania się wypływającej strugi z powietrzem.
14. **Str. 49** – w komorze izochorycznej w przypadku zapłonu po wtrysnięciu całej dawki wodór ulega spalaniu w czasie 3,15 ms. W symulacji czas ten wynosił 0,5 ms. Jak można wyjaśnić ponad 6-krotną różnicę? Oba przypadki powinny być pokazane na jednym wykresie.
15. **str. 51, rys. 9.6** – obserwacje bezpośrednie spalania wodoru w powietrzu są bardzo utrudnione z powodu bardzo małej jasności świecenia płomienia wodorowego. Potwierdzają to filmy autora, które w ograniczonym stopniu pozwalają na analizę zawirowania ładunku, rozwój płomienia i raczej nie pozwalają na obserwację

penetracji cząsteczek wodoru w głąb komory. Porównanie rys. 9.6 i 9.7 pozwala jednak wywnioskować, że w przypadku zapłonu po wtrysnięciu pełnej dawki wymieszanie wodoru z powietrzem jest lepsze i spalanie zachodzi w wielu kierunkach, natomiast w przypadku zapłonu w trakcie wtrysku można zaobserwować palącą się strugę wodoru. Nie jest prawdą stwierdzenie autora, że „mieszanka spala się praktycznie w całej objętości, bez występowania rozchodzenia się frontu płomienia”. Temperatura mieszaniny wodorowo-powietrznej jest zbyt niska aby doszło do samozapłonu w wielu miejscach komory i spalania objętościowego.

16. **Str. 57** – podobnie jak dla komory izochorycznej, brakuje w pracy informacji o użytym w symulacji silnikowej modelu turbulencji, modelu zapłonu iskrowego, modelu spalania. Na modelu CAD silnika brakuje położenia świecy zapłonowej i wtryskiwacza. Czy model silnika wiernie odpowiada geometrii silnika badawczego? Brak także informacji o zbadaniu jakości siatki obliczeniowej. Jak zamodelowano wpływ ruchu denka tłoka na siatkę obliczeniową? Badania symulacyjne mogły dostarczyć wielu interesujących informacji o przebiegu wtrysku, mieszania i spalania, dlaczego autor ograniczył się tylko do przedstawienia przebiegu ciśnienia, temperatury, masy wodoru i przebiegu wywiązywania ciepła w trakcie jednego cyklu roboczego?
17. **Str. 69** – czujnik zużycia wodoru – jak to mierzono?
18. **Str. 75** – jakie wyniki badań symulacyjnych wykorzystano przy opracowaniu układu zapłonowego? Brakuje schematu komory spalania silnika z podaniem położenia świecy zapłonowej i wtryskiwacza oraz kierunku wtrysku.
19. **Str. 80, rys. 11.15** – jak można wyjaśnić pulsacje ciśnienia występujące dla ubogiego składu ładunku?
20. **Str. 89, 6 l.d.** – jakie anomalie spalania występowały podczas pracy silnika z pełnym obciążeniem

5. Uwagi edytorskie

1. Str. 6 – $dP/d\alpha$ to szybkość narastania ciśnienia [MPa/°]; prędkość to wektor
2. Str. 6 – $dQ/d\alpha$ to szybkość wydzielania ciepła [MJ/°]
3. Str. 8, 17 l.g. – powinno być „zmusza nas do”
4. Str. 14, 7 l.d. – powinno być „łączenia wodoru z tlenem”
5. Str. 16, 5 l.g. – powinno być „stopień czystości wynoszący”
6. Str. 23, 8 l.d. – powinno być „zasilanie mieszanką bogatszą”
7. Str. 24, 7 l.g. – powinno być „mieszanki wodorowo-powietrznej” (dywiz, nie myślnik)

8. Str.26, 5 l.g. i 7 l.g. – powinno być „spalanie”
9. Str. 30, Rys. 7.2 – w podpisie jest W_m , a na osi W_0
10. Str.45, 7 l.g. – powinno być mieszanki wodorowo-powietrznej
11. Str.47, rys. 9.2 – λ na osi powinna być bezwymiarowa
12. Spis tabel i rysunków – spis ten powinien być na końcu pracy, za bibliografią.

Powyższe uwagi edytorskie są nieliczne i mają pomijalne znaczenie dla oceny pracy.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Praca jest bardzo ciekawa i dowodzi dużej wiedzy i samodzielności badawczej doktoranta. Istnieje, wskazana przez autora, możliwość dalszego rozwoju zaproponowanej koncepcji oraz po spełnieniu szeregu wymagań także wdrożenia do praktyki eksploatacyjnej.

Podsumowując stwierdzam, że autor sformułował oryginalny i aktualny problem naukowy, przeprowadził własne oryginalne badania numeryczne i doświadczalne na podstawie których opracował autorski system zasilania wodorem silnika tłokowego oraz sformułował wnioski.

Doktorant wykazał opanowanie warsztatu naukowego i umiejętność prowadzenia samodzielnych numerycznych i doświadczalnych badań naukowych, analizy wyników i wnioskowania. Doktorant posiadał umiejętność pisania rozprawy naukowej z jasno sformułowanym tytułem, celem, tezą i zakresem pracy oraz zwięzłym, przejrzystym i precyzyjnym opisem metodologii badań i wyników.

W mojej opinii recenzowana rozprawa stanowi oryginalny wkład naukowy w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Podkreślić należy, że ma również istotne znaczenie praktyczne.

Uwagi krytyczne, wymienione w punkcie 4 recenzji, nie obniżają wartości merytorycznej i wysokiej oceny ogólnej dysertacji. Wiele uwag ma charakter dyskusyjny i ich intencją jest pomoc w dalszym rozwoju naukowym Doktoranta.

Reasumując, uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego i publicznej obrony.

