prof. dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak

Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
Akademia Techniczno-Humanistyczna
w Bielsku-Białej

Bielsko-Biała, 20 luty 2019 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgra inż. Grzegorza Kruczka
pt. **„Experimental and numerical investigation of combustion process of conventional and alternative fuels in Internal Combustion Engines"**

Podstawa opracowania: pismo Pani Prodziekan ds. Nauki i Organizacji Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Joanny Kalki nr RIE-BD/4/165/2018/2019 z dnia 04.01.2019 r.

1. INFORMACJE OGÓLNE

Recenzowana rozprawa liczy ogółem 104 strony w tym 90 stron zasadniczego tekstu i 14 stron spisu literatury. Poprzedzona jest streszczeniem w języku angielskim i polskim, wykazem skrótów – akronimów, spisem symboli, treści, rysunków i tabel (ogółem materiał ten zawarto na 22 stronach). Na zakończenie rozprawy zamieszczono 12 stron załączników. Strony wstępne i załączniki nie zaliczono do ogólnej liczby stron pracy.

Zasadnicza część składa się z 5 ponumerowanych rozdziałów zawierających 43 podrozdziały. W tekście zamieszczono 38 rysunków i 11 tabel prezentujących przegląd stanu wiedzy oraz wyniki badań własnych. Uzupełnieniem jest spis literatury zawierający 169 pozycji w tym 149 to pozycje zagraniczne, 2 krajowe i 18 internetowych. Przeważająca większość z przytoczonych prac, bo aż 107, zostało opublikowanych po 2005 r., co podkreśla ich aktualność.

2. OCENA WYBORU TEMATU ROZPRAWY

Najważniejszym problemem, z którym borykają się producenci współczesnych silników spalinowych jest emisja toksycznych składników spalin i dwutlenku węgla, jako gazu cieplarnianego. Rozwój elektronicznych systemów sterowania jakością zasysanego ładunku, nowoczesne układy zasilania oraz powszechnie stosowane w samochodach katalityczne reaktory utleniające spowodowały, że stężenia emitowanego tlenku węgla CO i sumarycznych węglowodorów THC są porównywalne do stężeń tych związków w zasysanym powietrzu. Dlatego ocenia się, że obecnie emisja tych dwóch toksycznych składników nie jest motoryzacyjnym problemem dla środowiska. Mimo znacznego rozwoju systemów pozasilnikowego oczyszczania spalin tzw. *aftertreatment* nadal jednak poważnym problemem jest emisja tlenków azotu NO_x i cząstek stałych PM. Powszechnie uważa się, że normatywne limity emisji NO_x i PM ograniczają obecnie dalszy rozwój silników o zapłonie samoczynnym i

stanowią również istotną barierę rozwojową dla silników o zapłonie iskrowym z wtryskiem bezpośrednim.

Dodatkowym istotnym problemem współczesnych silników spalinowych jest limitowana emisja dwutlenku węgla CO_2 tzw. „gazu cieplarnianego". Emisja CO_2 jest wprost proporcjonalna do ilości zużywanego paliwa oraz zawartości węgla w paliwie (dla obydwu paliw ropopochodnych zawartość ta wynosi ok. 0,85). Z uwagi na większy udział wodoru w gazie ziemnym w stosunku do klasycznych paliw węglowodorowych, benzyny i oleju napędowego, emisja CO_2 z gazu ziemnego jest mniejsza o ok. 20%. Jeszcze korzystniejsze relacje występują przy stosowaniu biogazów, alkoholi i przetworzonych estrów kwasów tłuszczowych, bowiem w procesie ich powstawania wykorzystuje się biomasę odtwarzalną corocznie w procesie fotosyntezy. W procesach jej naturalnego rozkładu powstaje CO_2 i metan CH_4, który jest znacznie silniejszym gazem cieplarnianym w stosunku do CO_2. Z tego powodu w zasilaniu silników coraz powszechniej stosuje się biopaliwa, co znalazło odzwierciedlenie w przepisach i rządowych programach badań paliw i rozwoju źródeł energii.

Paliwa gazowe, w tym również biogaz o zawartości ok. 60% metanu i dużych zawartościach dwutlenku węgla ok. 30%, powodują istotne zmiany w przebiegu procesu spalania oraz wpływają na niezawodność i trwałość silników spalinowych. Należy zaznaczyć, że podstawowe znaczenie ma tutaj proces spalania, wpływający bezpośrednio na pozostałe negatywne oddziaływania eksploatacyjne. Z tego powodu w wielu ośrodkach na świecie prowadzone są intensywne badania procesu spalania mające na celu jego optymalizację i wykorzystanie pozytywnych cech gazów w zakresie ekonomii i ekologii pracy silników. Mimo dużej liczby opublikowanych prac w dalszym ciągu wiedza w zakresie wpływu paliw gazowych na pracę silnika jest niedostateczna. Wynika to z różnorodności stosowanych technik badawczych, rodzajów stosowanej aparatury oraz wycinkowości badań. Często o niekompletności publikowanych wyników decydują również względy komercyjne.

Recenzowana praca w całości poświęcona jest zagadnieniom wpływu paliw alternatywnych - gazu ziemnego i biogazu na przebieg procesu spalania i emisję w silniku o zapłonie iskrowym. Zagadnienie te w dalszym ciągu są niedostatecznie rozpoznane w kraju i na świecie Z przedstawionych wyżej powodów można uznać, że **tematyka dysertacji jest bardzo ważna z punktu widzenia możliwości wykorzystanie gazowych paliw alternatywnych do zasilania silników spalinowych i dla ochrony środowiska.**

Z tego powodu wybór tematu rozprawy uważam za bardzo uzasadniony.

3. ANALIZA UKŁADU I TREŚCI ROZPRAWY

Zasadnicza treść rozprawy poprzedzona jest streszczeniem, w którym Autor charakteryzuje sposób prowadzenia badań oraz główne dokonania dysertacji. Następnie podano wykaz ważniejszych skrótów i symboli co znacznie ułatwia czytanie pracy. Zasadnicza część rozprawy podzielona jest na 5 rozdziałów.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do tematyki rozprawy związanej z zagadnieniami gazowego zasilania silników spalinowych. Autor zwrócił uwagę na duży udział transportu drogowego w całkowitej emisji zanieczyszczeń do atmosfery związanej z działalnością człowieka. Szczególnie dotyczy to emisji NO_x i PM, która kilkakrotnie przewyższa emisję sektora energetycznego. Natomiast emisja gazu cieplarnianego CO_2 z sektora energetycznego i transportu drogowego jest podobna. Może być ona ograniczona przez zastosowanie do zasilania

silników (stosowanych w transporcie i generatorowych silnikach stacjonarnych) gazów o mniejszym udziale atomów węgla w cząsteczkach, takich jak biogazy, metan, LPG. Równocześnie zasilanie gazowe rokuje zmniejszenie emisji pozostałych zanieczyszczeń, co zachęca do badań w tym zakresie. Zdaniem Autora szersze stosowanie biopaliw powstających z biomasy w wyniku fermentacji, zgazowania i pirolizy może przyczynić się do znacznego zmniejszenia emisji CO_2, bowiem cały proces można potraktować jako „zero-emisyjny".

Odmienność własności fizykochemicznych gazów w stosunku do paliw konwencjonalnych powoduje zmiany w przebiegu spalania wpływające na parametry użytkowe i ekologiczne silnika. Gwałtowny, niekontrolowany i stochastyczny charakter spalania wymaga zdaniem Autora zastosowania badań symulacyjnych z wykorzystaniem zaawansowanych programów komercyjnych FVM – Finite Vulume Method, Ansyss Fluent czy Ansys Reaction Desing Forte oraz opracowania własnych modeli spalania.

W dalszej części rozdziału Autor przedstawia informacje dotyczące opisu silnika i stanowiska badawczego, programu badań stanowiskowych i parametrów oceny procesu spalania. Wyniki badań hamownianych silnika były w dalszej części pracy podstawą do porównań z wynikami badań symulacyjnych.

W podrozdziale 1.1 „Motivation" Autor przedstawia główny cel pracy, którym było **poszerzenie wiedzy o procesie spalania metanu i biogazu w silnikach spalinowych**. Wprawdzie w podrozdziale 1.2 cele pracy podzielono na 5 odrębnych zagadnień, jednak moim zdaniem zawierają się one w podanym wyżej celu głównym.

Zastosowanie paliw gazowych sprzyja ochronie zasobów ropy naftowej i ochronie środowiska. Dodatkowym uzasadnieniem podjętych badań jest fakt, że biogaz jest gazem odpadowym w procesie oczyszczania ścieków i utylizacji odpadów, jego ilość będzie ciągle wzrastać, a proces jego racjonalnego zagospodarowania wpływa korzystnie na prawidłowe zużycie energii i ochronę środowiska.

W pracy nie postawiono tezy wymagającej udowodnienia, co jest najczęstszym elementem rozpraw naukowych jakim powinna być dysertacja. Można uznać, że postawiony cel główny spełnia taką rolę. Jest on jednak bardzo ogólny i każde wyniki badań, czy uogólnienia oraz wnioski, mogą być potraktowane jako materiał spełniający tak sformułowany cel pracy. Sformułowane w ten sposób zagadnienie naukowe obniża jednak metodologiczną wartość ocenianej pracy.

Zdaniem Autora uproszczone modele spalania używane w komercyjnych programach Ansys, AVL-Fire i KIVA nie pozwalają na prawidłowe modelowanie procesów tworzenia rodników i składników spalin jak przykładowo CO. Dlatego w pracy wykorzystywano bardziej zaawansowane programy Ansys Fluent i Ansys Reaction Design Forte. Zastosowanie programu Ansys Forte podyktowane było możliwością wprowadzania w tym programie zmian w modelu spalania, prowadzących do lepszego przystosowania go do rzeczywistych procesów spalania w badanym silniku.

Na zakończenie wstępu w podrozdziale 1.3 przedstawiono przegląd literatury związanej z tematem pracy. Składa się on z dwóch części: 1,5 stronicowego przeglądu prac związanych z gazowym zasilaniem silników i 3,5 stronicowego przeglądu dotyczącego modelowania procesów silnikowych. Przegląd literatury przedstawiony w rozdz. 1.3 nie jest w zasadzie analizą aktualnego stanu wiedzy. Wprawdzie przytoczono w nim wiele prac dotyczących zasilania gazem i modelowania, jednak bez analizy ich treści. Istotne zagadnienia związane z wpływem gazowego

zasilania na pracę silnika są potraktowane bardzo marginalnie (1,5 strony), ponadto nie odniesiono się do obszernych prac w tym zakresie wykonanych w kraju, w tym również w zakresie modelowania. Zasadnicza część tego rozdziału zawiera ogólne wiadomości bez pogłębionej analizy Autora dysertacji. W szczególności na zakończenie nie podano jakie obszary wiedzy są niedostatecznie rozpoznane, i które z nich są przedmiotem badań Autora.

W rozdziale drugim przedstawiono wyniki badań stanowiskowych dla dwóch gazów: metanu (odpowiednik sieciowego gazu ziemnego wysokometanowego) oraz gazu przygotowywanego w laboratorium na potrzeby badań, o własnościach odpowiadających przeciętnym biogazom. W dalszej części pracy obydwa gazy nazywane są jako „metan" i „biogaz". Prezentacja wyników badań poprzedzona jest szczegółowym opisem stanowiska badawczego (rozdz. 2.1). Do badań użyto jednocylindrowego silnika o pojemności skokowej 331 cm^3 i stopniu sprężania ε=10. Silnik zbudowany w 1952 roku był pierwotnie przeznaczony do badań liczby oktanowej paliw. Miało to wpływ na rodzaj komory spalania, a właściwie jej brak w rozumieniu współczesnych silników, oraz wyposażeniu silnika w system zmiany stopnia sprężania w zakresie ε=4-10. W celu przystosowania silnika do badań wprowadzono w nim szereg modyfikacji: wtrysk paliwa ciekłego (bezpośredni i do kolektora dolotowego), wtrysk gazu do kolektora, system chłodzenia ze stabilizacją temperatury, system stabilizacji prędkości obrotowej silnika. W głowicy, kolektorze dolotowym i wylotowym oraz silniku zainstalowano szereg czujników do automatycznej kontroli stanu termicznego silnika, parametrów przepływu czynnika, rejestracji ciśnienia w komorze spalania i stężenia składników spalin. Zarówno sposób modyfikacji jak i rodzaj zastosowanych czujników i aparatury badawczej odpowiadają współczesnym standardom prowadzenia badań silnikowych, co gwarantuje w moim przekonaniu wiarygodność uzyskanych wyników.

W podrozdziale 2.2 przedstawiono wyniki badań stanowiskowych silnika pracującego z pełnym obciążeniem przy prędkości obrotowej 1500 obr/min. Dla obydwu stosowanych gazów skład mieszaniny palnej zmieniano w zakresie współczynnika nadmiaru powietrza λ=0,95-1,20. Stosowano trzy kąty wyprzedzenia zapłonu: 30°OWK, 35°OWK i 40°OWK przed GMP. W pracy nie podano wg jakich kryteriów dobierano kąt wyprzedzenia zapłonu. Wydaje się, że uwzględniając wielkość silnika i jego prędkość obrotową kąty 35°OWK i 40°OWK są zbyt wczesne.

Na rys. 2.3-2.10 przedstawiono zbiorcze porównania ciśnień w cylindrze, temperatury średniej czynnika, szybkości wydzielania ciepła, stopnia wypalenia paliwa, sprawności wolumetrycznej, indykowanej, średniego ciśnienia indykowanego oraz emisji CO, HC i NO_x. Parametry związane ze spalaniem przedstawiono w zależności od kąta obrotu wału korbowego (w czasie przebiegu spalania), a parametry użytkowe w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza. Zarówno wybór parametrów jak i sposób przedstawienia wyników uważam za adekwatny do oceny wpływu badanych paliw na przebieg procesu spalania i parametry użytkowe silnika. Na pozytywne podkreślenie zasługuje merytoryczna analiza wyników przeprowadzona indywidualnie dla każdego analizowanego parametru. Rozdział drugi obejmujący 14 stron tekstu opracowano bardzo starannie i wnikliwie.

W obszernym (24 strony – 27% tekstu zasadniczego) rozdziale trzecim przedstawiono opis procedur modelowania. W pracy wykorzystywano dwa komercyjne programy Ansys Fluent i Ansys Forte, zdaniem Autora najbardziej odpowiednie do modelowania spalania w silnikach o

zapłonie iskrowym. Równocześnie *a priori* odrzucono stosowane dość powszechnie w analizach procesów silnikowych programy KIVA-3 i AVL Fire. Zdaniem Autora program Ansys Forte, który został opracowany w kooperacji firm Chemkin i Ansys przez możliwość wprowadzenia specyficznych cech silnika i prawidłowych danych wejściowych (modelu spalania) umożliwia lepsze dopasowanie symulacji spalania do rzeczywistych procesów przez co uzyskuje się dobrą zgodność wyników z badaniami stanowiskowymi. Parametry geometryczne modelu i wymiary siatki wprowadzano na podstawie szczegółowych pomiarów elementów silnika: głowicy, tłoka, zaworów, kanałów dolotowego wylotowego. W rozdziale opisano zasadnicze różnice w procedurach symulacji między programami Ansys Fluent i Ansys Forte, w szczególności w zakresie modeli spalania (*premixed, kinetics* i *partialy premixed combustion*), zapłonu mieszaniny, strat ciepła. Materiał opisowy zawiera dużą ilość wzorów, ze szczegółowym opisem ich znaczenia i stosowanymi symbolami. Różnice między modelami zestawiono w tabelach 3.1-3.3.

W końcowej części rozdziału przedstawiono założenia przyjęte w modelu matematycznym wykorzystywanym w pracy, wzory związane z wymianą ciepła, funkcję spalania oraz algorytm obliczeń. W ostatniej części rozdziału pokazano porównanie wyników eksperymentu i symulacji dla ciśnienia i temperatury średniej czynnika w czasie spalania. Porównanie wykazało dobrą zgodność wyników, co pozwala przypuszczać, że zastosowana metodyka i wzory matematyczne mogą być wykorzystane do dalszych badań symulacyjnych, a ich dokładność pozwala na wyciąganie wniosków o charakterze ogólnym.

Materiał przedstawiony w rozdziale trzecim świadczy o bardzo dobrym opanowaniu zagadnień symulacji procesów silnikowych przez Autora dysertacji. Wymagało to opanowania wiedzy z wielu dziedzin oraz przeglądu obszernej literatury. Świadczy to pozytywnie o predyspozycjach Autora do dalszej pracy naukowej.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wykonywanych zgodnie z procedurami opisanymi w rozdziale 3. Przed przystąpieniem do zasadniczej części badań porównano wyniki symulacji 3D wg Ansys Fluent i Ansys Forte dla przepływu czynnika przez cylinder bez spalania. Porównanie wykazało dobrą zgodność wyników wg Fluent Forte z wynikami doświadczalnymi. Następnie przeprowadzono porównanie wyników symulacji spalania stechiometrycznej mieszaniny benzyna-powietrze wg procedury 2D Fluent dla różnych modeli (*eddy-dissipation, premixed* i *partiallly-premixed*). Porównanie wykazało podobne profile ciśnienia dla modeli *eddy-disipation* i *premixed* i brak spalania dla modelu *partialy-premixed*. Podobne wyniki uzyskano dla modelu *partialy-premixed* przy symulacji 3D .W związku z tym model ten pominięto w dalszych symulacjach. Wyniki symulacji dla dwóch pozostałych modeli pokazały gwałtowny przebieg spalania w początkowej fazie procesu, podobnie do teoretycznego obiegu Otto, a odmiennie w stosunku do przebiegu rzeczywistego spalania, szczególnie homogenicznej mieszaniny. Dalsze porównania danych doświadczalnych i symulacji 3D dla procedur 3D Fluent i 3D Forte, pokazały lepszą zgodność symulacji z danymi doświadczalnymi dla procedury 3D Forte. Szczegółowa analiza wyników pozwoliła Autorowi na wyciagnięcie wniosku, że program 3D Forte najlepiej odzwierciedla rzeczywiste przebiegi reakcji i procesów zachodzących w silnikach tłokowych. Dlatego ten program był wykorzystywany w dalszych symulacjach. Wnikliwa i skomplikowana analiza przydatności różnych modeli spalania i procedur obliczeniowych, przeprowadzona przed zasadniczymi badaniami symulacyjnymi, świadczy bardzo dobrze o Autorze dysertacji. Nie przyjmuje on bowiem *a priori* poprawności

wyników komercyjnych programów co ma niestety często miejsce w publikowanych pracach innych autorów. Autor dysertacji sonduje na początku, który z programów i modeli jest najlepszy dla oceny spalania paliw alternatywnych w silnikach, jaka jest czułość wybranego programu w odniesieniu do poszczególnych faz spalania i jakich błędów symulacji można się spodziewać. To rzadkość w ocenianych dotychczas przeze mnie pracach. Po tak dogłębnej analizie można mieć nadzieję wiarygodności przedstawianych wyników.

W dalszej części rozdziału przedstawiono porównania wyników symulacji dla następujących parametrów:

- prędkości płomienia laminarnego w zależności od składu mieszaniny palnej (rys. 4.3) i podczas spalania (rys. 4.4),
- średniej szybkości płomienia turbulentnego (rys. 4.5),
- parametrów oceny procesu spalania: chwilowej masy paliwa spalonego (rys. 4.6-4.8), ciśnienia w cylindrze (rys. 4.9-4.11), temperatury średniej czynnika (rys. 4.12-4.13), strat ciepła (rys. 4.14),
- emisji spalin trzech podstawowych składników toksycznych CO, HC i NO_x (rys. 4.15-4.21),
- składu molowego CO, HC i NO_x w trakcie spalania (rys. 4.22-4.23).

Symulacje przedstawiono dla spalania metanu i biogazu, dla różnych składów mieszaniny palnej λ=0,95-1,20 oraz trzech kątów wyprzedzenia zapłonu – 30°OWK, 35°OWK, 40°OWK przed GMP. Wyniki symulacji każdorazowo porównywano z wynikami badań doświadczalnych silnika. Wszystkie wymienione rysunki zawierają zbiorcze wyniki, co świadczy o obszerności wykonanych badań symulacyjnych. Przedstawione rysunki są wykonane starannie i czytelnie z pełnymi opisami, a wykonane analizy cechuje wnikliwość i merytoryczna poprawność. Powoduje to łatwość czytania tekstu i pokazuje różnorodność wyników zależną od zastosowanego paliwa i parametrów regulacyjnych.

Rozdział czwarty uważam za najbardziej wartościową część dysertacji, interesującą z naukowego punktu widzenia, co stanowi istotne osiągnięcie Autora.

Ostatni rozdział piąty stanowi posumowanie głównych osiągnięć pracy. Został on podzielony na trzy podrozdziały obejmujące podsumowanie, uwagi i wnioski końcowe oraz plan dalszych badań.

W podsumowaniu przedstawiono w skrócie sposoby realizacji głównych celów pracy, adaptację silnika badawczego, parametry służące do porównania procesu spalania paliwa tradycyjnego i paliw alternatywnych. Uzasadniono celowość wykorzystania programów Ansys Fluent i Ansys Forte do symulacji procesu spalania i tworzenia związków toksycznych spalin. Zasygnalizowano podstawowe różnice między wynikami symulacji wg obydwu programów jakie uzyskano w trakcie realizacji pracy.

W kolejnym rozdziale przedstawiono główne wyniki uzyskane w trakcie realizacji pracy. Pokazano zmiany parametrów użytkowych silnika zasilanego kolejno metanem i biogazem uzyskane w badaniach eksperymentalnych, oraz porównanie wyników eksperymentu i symulacji. Informacje zawarte w tym rozdziale, a dotyczące zastosowanych programów i modeli symulacyjnych, oraz sposobu ich walidacji nie mają charakteru ogólnego i moim zdaniem nie wiążą się bezpośrednio z tematem dysertacji. Nie sformułowano wniosków o charakterze ogólnym, przydatnych w aplikacjach silników stacyjnych pracujących na paliwach alternatywnych, również innych od badanych paliw.

Na zakończenie, w oddzielnym podrozdziale, przedstawiono zakres badań jakie zdaniem Autora należałoby jeszcze wykonać w zakresie zasilania silników paliwami alternatywnymi.

Układ pracy uważam za prawidłowy i adekwatny dla postawionego celu głównego. Wszystkie rozdziały zostały opracowane w sposób przemyślany i wyczerpujący. Świadczy to bardzo pozytywnie o kwalifikacjach naukowych Autora dysertacji

4. MERYTORYCZNA OCENA PRACY

Autor w ocenianej pracy zajmował się ważnym zagadnieniem dotyczącym wpływu gazowych paliw alternatywnych, gazu ziemnego (metan) i gazu fermentacyjnego (oznaczonego jako „bio", w badaniach komponowano gaz zwierający ok. 50% metanu i 44% dwutlenku węgla), na parametry użytkowe silnika, przebieg procesu spalania i emisję toksycznych składników spalin. Prace obejmowały badania hamowniane jednocylindrowego silnika o pojemności skokowej 331 cm^3 i symulacje procesu spalania z użyciem komercyjnego programu 3D Fluent Forte. Zarówno badania hamowniane jak i symulacyjne przeprowadzono dla dwóch gazów „metan" i „bio" dla różnych składów mieszaniny palnej λ=0,95-1,20 i różnych kątów wyprzedzenia zapłonu 30-40°OWK przed GMP. Z uwagi na niedostatecznie rozpoznane wpływu paliw gazowych na proces spalania w silniku o zapłonie iskrowym, porównanie badań hamownianych i symulacyjnych, analizę procesu tworzenia związków toksycznych w czasie spalania, tematyka ocenianej pracy jest bardzo aktualna i w moim przekonaniu cenna dla rozwoju silników spalinowych.

Treść pracy odpowiada postawionemu celowi, a podsumowanie potwierdza realizację celu głównego pracy. Zarówno pod względem merytorycznym jak i metodologicznym pracę oceniam pozytywnie.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

1. Ważny z naukowego i praktycznego punktu widzenia temat dysertacji dotyczący oceny wpływu paliw gazowych na przebieg procesu spalania mieszanin o różnych składach. Określenie zakresu zmian parametrów użytkowych i ekologicznych silnika oraz optymalnego składu mieszaniny palnej dla różnych kryteriów optymalizacji. Uzyskane wyniki mogą być wykorzystane w adaptacjach silników do zasilania słabymi gazami, przykładowo gazem fermentacyjnym lub wysypiskowym.
2. Weryfikacja dużej liczby komercyjnych programów symulacyjnych i określenie ich przydatności do symulacji spalania w silnikach o zapłonie iskrowym. Wskazanie czułości programów przy określaniu różnych parametrów i spodziewanych błędów symulacji dla różnych faz spalania.
3. Wykonanie obszernych badań symulacyjnych i porównania wyników symulacji z wynikami badań hamownianych.
4. Badania symulacyjne procesów tworzenia związków toksycznych w procesie spalania i określenie parametrów mających istotny wpływ na stężenia zanieczyszczeń w spalinach po zakończeniu spalania.
5. Wnikliwe opracowanie wyników badań i przejrzysty sposób ich prezentacji. Staranne analizy wyników z wykorzystaniem czytelnych i dobrze opisanych rysunków. Ułatwia to wyciąganie

wniosków i zrozumienie treści rozprawy. Fakty te potwierdzają dobre kompetencje Autora do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

6. Bardzo staranna edycja pracy, poprawny technicznie i zrozumiały język.

W trakcie czytania pracy nasunęły się również pewne wątpliwości i uwagi, które wymagają wyjaśnienia. Uwagi te wynikają z odmiennego spojrzenia recenzenta na zagadnienia poruszane w pracy i są równocześnie zachętą do dalszej dyskusji. W moim przekonaniu zamieszczone poniżej uwagi nie obniżają jednak mojej pozytywnej oceny pracy.

1. Co skłoniło Autora do badań silnika zasilanego bogatą mieszaniną o współczynniku nadmiaru powietrza λ=0,95. Przy elektronicznie sterowanych systemach zasilania, silniki o zapłonie iskrowym pracują na mieszaninach stechiometrycznych. Dla mieszanin bogatych występuje strata energetyczna zmniejszająca sprawność ogólną silnika i powodująca zwiększoną emisję tlenku węgla i niespalonych węglowodorów. Proszę o wyjaśnienie tego zagadnienia na obronie.
2. Z czego wynikają tak znaczne różnice sprawności wolumetrycznej η_{vol} między zasilaniem metanem i biogazem, pokazane na rys. 2.9a. Zaprezentowane różnice wynoszą 7-8,5%. Wydają się one zbyt duże, uwzględniając różnice udziałów objętościowych i gęstości między metanem i biogazem.
3. W pracy nie podano jaki rodzaj mocy P wykorzystywano we wzorze 2.6 i 2.7 na str. 26. Jeżeli była to moc odbierana na hamulcu to z wzoru 2.7 otrzymujemy sprawność ogólną silnika, a jeżeli była to moc indykowana (całka pdV) otrzymujemy moc cieplną $\eta_c=\eta_t \cdot \eta_i$ będącą iloczynem sprawności teoretycznej i indykowanej. W obydwu wypadkach nie jest to jednak sprawność indykowana jak opisano na rys. 2.9 str. 27 i jak używa się w tekście pracy. Wartości sprawności pokazane na rys. 2.9 sugerują, że jest to raczej sprawność ogólna.
4. We wzorach 3.39 i 3.42 przyjmowano jednakową temperaturę dla ścianek komory spalania. W rzeczywistości temperatury denka tłoka, głowicy i cylindra są różne, największe dla denka tłoka, najmniejsze dla tulei cylindrowej. Ponadto temperatura tulei cylindrowej jest zmienna w zależności od położenia tłoka od GMP do DMP. Czy Autor badał wpływ zróżnicowania temperatur dla tych powierzchni wymiany na ogólną ilość ciepła traconego?
5. W rozdziałach 3.4.1-3.4.4 szczegółowo opisano różne modele zapłonu i spalania, w tym wpływu turbulencji i postępu frontu płomienia, stosowane w programach Ansys Fluent i Ansys Forte. Natomiast w rozdziale 3.6.2 podano, że w symulacjach do określenia stopnia wypalenia paliwa MFB wykorzystywana była uproszczona funkcja Wiebego (wzór 3.36). Funkcja ta opracowana na podstawie kinetyki reakcji chemicznych dobrze odzwierciedla spalanie homogenicznej mieszaniny w silnikach o zapłonie iskrowym, w tym szczególnie tak prostego paliwa jakim jest metan, podstawowy składnik palny gazu ziemnego i biogazu. Proszę o wyjaśnienie tego problemu na obronie.
6. Ocena masy czynnika w cylindrze z równania stanu zgodnie z wzorem 4.2 str. 59 jest dość ryzykowna, bowiem na wartość ciśnienia p_2 wpływają straty wymiany ciepła, których nie szacowano. Ponadto temperaturę określano z wzoru 4.1 zawierającego również ciśnienie p_2. W efekcie straty masy obliczone wynosiły ok. 10% i były 3-4 większe od notowanych eksperymentalnie dla silników czterosuwowych.
7. Na rys. 4.9 ciśnienia obliczane i eksperymentalne w późniejszych fazach spalania 400-420°OWK były podobne, a dla λ=1,10 i 1,20 nawet mniejsze od mierzonych. Z kolei pokazane na rys.4.12 temperatury średnie obliczone dla tego samego zakresu kątów są o 300-

400 K wyższe od uzyskanych z badań. Jak to wyjaśnić, przecież temperatura z ciśnieniem jest powiązana równaniem stanu.

8. Porównanie emisji HC przedstawione na rys. 4.18 wykazało duże różnice wyników obliczanych i mierzonych. Na rys. 4.18b mierzona emisja HC dla biogazu jest bliska zeru, podczas gdy symulowana dla kątów wyprzedzenia zapłonu 30°OWK i 35°OWK zmienia się zakresie 5000-15.000 ppm. Na jakiej podstawie zatem Autor wyciąga wniosek, że uzyskano w obliczeniach podobne tendencje do wyników pomiarów (str. 79, wiersz 4 od dołu)?
9. Na stronie 89 Autor pisze, że najwyższa zawartość zanieczyszczeń (toksycznych składników spalin) znajduje się w okolicach iskry zapłonowej. Wyciąga dalej wniosek, że zmniejszenie temperatury, w domniemaniu ładunku, w momencie zapłonu ma zasadnicze znaczenie w zmniejszeniu emisji. Jest to daleko idące uproszczenie we właściwym rozumieniu procesów silnikowych. Powszechnie bowiem wiadomo, że wyższa temperatura podczas zapłonu prowadzi do zwiększenia sprawności ogólnej silnika, a silniki stacyjne z natury rzeczy pracujące pod maksymalnym obciążeniem powinny osiągać jak najwyższe sprawności. Ponadto w jaki sposób należałoby regulować temperaturę podczas zapłonu? Warto również zaznaczyć, że strefa obejmowana przez iskrę jest stosunkowo mała w porównaniu z objętością komory spalania, a czas trwania iskry bardzo krótki.

Uwagi szczegółowe

Praca jest wykonana bardzo starannie, napisana poprawnie językowo, w przeważającej części użyto prawidłowej terminologii. Zdarzają się jednak drobne błędy redakcyjne. Poniżej przytaczam pewną ilość drobnych usterek, zauważonych podczas czytania pracy:

1. Zamiast SOS *Start Of Spark* lepiej używać ST – *Spark Timing*, bowiem SOS jest powszechnie kojarzone z innym znaczeniem i używane do innych celów.
2. str. 4, rys. 2.9 – w teorii silników spalinowych powszechnie używane jest określenie „współczynnik nadmiaru powietrza" dlatego zamiast *„oxygen excess ratio"* lepiej używać *„excess air ratio"*.
3. str. 48 – czy założenie, że temperatura mieszaniny jest równa temperaturze otoczenia jest prawidłowe? Równość temperatur potwierdzono również na str. 50, wiersz 16 od góry. Temperatura mieszaniny po wlocie do cylindra jest wyższa od temperatury otoczenia wskutek ogrzewania od ścianek kanału dolotowego i zaworu.
4. str. 50, wiersz 17 od góry – temperatura 80°C dla ścianki cylindra jest zbyt mała, jeśli wykorzystuje się ją do obliczania wymiany ciepła. Tuleja cylindrowa ma znacznie wyższą temperaturę od strony osi cylindra i mniejszą od strony cieczy chłodzącej (zbliżona do temperatury cieczy). Ponadto temperatura ścianki cylindra jest zmienna wzdłuż tworzącej między punktami GMP i DMP.
5. Str. 74, rys. 4.14 – czy jednostka strat ciepła [J] jest prawidłowa. Czy straty nie były obliczane w [J/cykl]?

5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Na podstawie analizy treści stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie naukowej ***Budowa i eksploatacja maszyn***.

Praca stanowi wartościową pozycję zarówno pod względem poznawczym jak i utylitarnym. Problematyka pracy jest ważna w zakresie oceny możliwości wykorzystania gazu

ziemnego i biogazu do zasilania współczesnych silników spalinowych, oceny prawidłowego przebiegu spalania i emisji spalin.

Dużym osiągnięciem pracy jest przeprowadzenie obszernych badań symulacyjnych i porównanie ich z wynikami badań doświadczalnych. Wyniki badań poddano naukowej analizie w sposób uporządkowany i metodyczny.

W moim przekonaniu przeprowadzone analizy i uzyskane wyniki badań są przekonywujące i w pełni potwierdzają postawiony cel główny pracy.

Zawarte w opinii uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Należy zaznaczyć równocześnie, że niektóre z uwag mają charakter dyskusyjny czy wyjaśniający lub stanowią alternatywne podejście do zagadnienia.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Grzegorza Kruczka pt. **„Experimental and numerical investigation of combustion process of conventional and alternative fuels in Internal Combustion Engines"** spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 (wraz z późn. zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Grzegorza Kruczka do publicznej obrony ocenianej dysertacji.