

Poznań, 4 grudnia 2021 r.

prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha
Instytut Silników Spalinowych i Napędów
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Jaworskiego
pt.: „Numerical Modeling of Internal Combustion Engine Phenomena
with LES Combustion Model”
(promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk)

Podstawa opracowania:

Zlecenie Przewodniczącego Rady naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna

Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. Roberta Sitnika

Nr RNDIM/521/13/2021

z dnia 20.09.2021 r.

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Współczesne prace badawcze w zakresie analizy procesów zachodzących w silnikach spalinowych dotyczą dwóch rozwiązań: badań eksperymentalnych oraz badań symulacyjnych. Dotychczasowe analizy wskazywały na dużą i znaczącą rolę badań eksperymentalnych. Prawidłowość ich prowadzenia powoduje, że ich wyniki są niepodważalne i stanowią przeważnie podstawę do dalszych zaawansowanych prac naukowych.

Prace symulacyjne realizowane z wykorzystaniem współczesnych systemów obliczeniowych muszą bazować na osiągnięciach i wynikach badań eksperymentalnych. Samodzielne istnienie tych rozwiązań nie prowadzi obecnie do rozwoju zarówno systemów spalania oraz systemów oczyszczania spalin. Wynika z tego, że prace symulacyjne są nieodłącznym elementem prac eksperymentalnych.

Czaso- i energochłonność badań eksperymentalnych powoduje, że dużego znaczenia nabierają prace symulacyjne. Równania Reynoldsa, jako zmodyfikowane równania Naviera-Stokesa przystosowane do opisu przepływów burzliwych stanowią podstawę modeli turbulentnych RANS. Bezpośrednie rozwiązanie tych równań (NS) bez jakichkolwiek uproszczeń (oznaczające uwzględnienie wszystkich skal turbulencji) wymaga tzw. metod bezpośredniego rozwiązywania – DNS. Metodą pośrednią, stanowiącą kom-

promis między powyższymi metodami, jest metoda symulacji dużych wirów turbulentnych określana jako LES. Jest to rozwiązanie pośrednie między wymaganiami narzuconymi przez złożoną strukturę przepływu turbulentnego i dostępnymi obecnie możliwościami obliczeniowymi.

Modelowaniem takich przepływów zajął się w pracy Doktorant. Oznacza to, że tematyka przedstawiona w dysertacji jest aktualna, a co ważniejsze – nie w pełni poznana. Doktorant, mgr inż. Piotr Jaworski podjął w pracy właśnie taki temat, stawiając sobie za jej cel, zsyntezowane ujęcie problematyki spalania w silnikach tłokowych i palnikach z wykorzystaniem modelowania typu LES. Integracji tych zagadnień, doktorant podjął się w postaci wykorzystania modelu spalania opracowanego przez Molkova i in. w oprogramowaniu AVL Fire z prowadzeniem badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych.

Rozprawę napisano w języku angielskim, liczy ona 132 strony tekstu obejmującego 5 rozdziałów oraz spis literatury zawierający 116 pozycji. W pracy dodatkowo zamieszczono spis skrótów i oznaczeń; zawarto spis rysunków i tabel.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym *Wprowadzenie*, Doktorant przedstawił skróto-owe rozpoznanie tematyki rozprawy, wykazał różnice w metodyce rozwiązywania procesów symulacyjnych metodami RANS, LES oraz DNS. Doktorant wskazał na cel pracy jakim jest adaptacja modelu spalania zaproponowanego przez Molkova do silników spaliniowych z zastosowaniem modelowania typu LES. Stwierdzono, że taki typ modelowania przyczynia się do rozwoju obliczeniowej dynamiki płynów szczególnie w zakresie procesu spalania.

W kolejnym, drugim rozdziale zatytułowanym *Przegląd literatury*, Autor dokonał analizy obliczeniowej mechaniki płynów w zastosowaniach silnikowych. Przedstawiono prace dotyczące starszych rozwiązań systemów zasilania (MPI) oraz nowszych – ZI DI. Analizowano także rozwiązania typu HCCI oraz zastosowanie CFD do analizy spalania stukowego. W tym samym rozdziale przedstawiono podstawy modelu numerycznego zastosowanego w pracy oraz odniesiono te rozwiązania do modelowania typu RANS i innych. Opisane w tym rozdziale różnice dotyczące modelowania RANS i LES w znaczący sposób pomagają zrozumieć dalsze etapy postępowania Autora. Przedstawiono tu model Smagorinskiego oraz modele spalania LES wraz z przykładowymi wynikami literaturowymi. Czasami te wyniki są dość mało komunikatywne, np. na str. 30 przedstawiono rysunek dotyczący wtrysku wodoru (z treści pracy nie wynika dlaczego nastąpiło zwiększenie gęstości ładunku do $3,8 \text{ kg/m}^3$ w zewnętrznej jego warstwie).

Rozdział trzeci zatytułowany *GCM Combustion Model* dotyczy w początkowej jego części zerowymiarowego modelu tworzenia produktów spalania, a w dalszej – jego implementacji w AVL FIRE. W kolejnej części tego rozdziału Autor przedstawił zagadnienia dotyczące laminarnej prędkości spalania. Dość szczegółowo omówiono równania określające prędkości spalania różnych paliw wraz z charakterystycznymi współczynnikami tych równań. W podrozdziale 3.1 Autor przedstawia różnice w prędkości laminarnego spalania, jednak trudno rozpoznać, które wyniki są autorskie i jaki jest wkład Doktoranta w wyniki badań tam zawarte. Podrozdział 3.2 – dość krótki – zawiera rozbudowane wielkości tabelaryczne. Nie jest wiadome, czy te dane Autor wykorzystuje w dalszej części swojej rozprawy? Czy mnogość analizowanych tam paliw znajduje swoje odzwierciedlenie w badaniach silnikowych? W ostatniej części tego rozdziału przedstawiono informacje dotyczące samozapłonu paliw. Badania eksperymentalne dotyczą typowego układu zapłonowego lekkich paliw węglowodorowych. Dlaczego więc ten temat tutaj jest analizowany?

Rozdział czwarty dotyczy *Prezentacji Wyników*. Tutaj Autor poświęcił wiele miejsca analizom porównawczym badań symulacyjnych i eksperymentalnych. W rezultacie uzyskano dużą zgodność dotyczącą pola prędkości przy 65 m/s i zmniejszającą się tą zgodność wraz ze zmniejszaniem prędkości wypływu. Podobne tendencje odnotowano w pozostałych analizowanych wskaźnikach.

Kolejne elementy rozdziału czwartego wydają się być esencją tej pracy. Dotyczą one symulacji silnikowych z zastosowaniem Gradientowego Modelu Spalania. Badania te prowadzone na jednocylindrowym silniku badawczym AVL FM540 dotyczyły fluktuacji ciśnienia w kolejnych cyklach jego pracy. Rozdział ten – jako ostatni merytoryczny – jest podsumowaniem badań eksperymentalnych i symulacyjnych dotyczących metody LES w silnikach spalinowych.

W ostatnim rozdziale – *Podsumowaniu* – dokonano odniesienia do modelu zawartego w pracy Chena i in. Potwierdzono dobre dopasowanie symulacyjne rozwoju płomienia z badaniami eksperymentalnymi. Dodatkowo wyciągnięto wnioski w zakresie badań powtarzalności cykli pracy silnika. Stwierdzono, że metoda LES jest przyszłościowym rozwiązaniem w analizach wielu cykli pracy silnika.

2. OCENA ROZPRAWY

2.1. Uwagi ogólne

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę należy ocenić dość wysoko. Autor przedstawia zaawansowany materiał naukowy dotyczący teoretycznego i praktycznego ujęcia problematyki pracy. Problematykę tę przedstawiono trój etapowo:

- a) w postaci analiz literaturowych modelowania LES,
- b) badań symulacyjnych płomieni otwartych z wykorzystaniem wyników eksperymentalnych dotyczących palnika Bunsena oraz
- c) symulacyjnych i eksperymentalnych badań silnikowych.

Wszystkie etapy poparto naukowymi wywodami prowadzącymi do synergii tych procesów uwzględniając jednocześnie jakościowe możliwości porównania uzyskanych wyników. W konsekwencji badań płomieni otwartych i zamkniętych powstał model LES, który umożliwi ocenę wielu cykli pracy silnika spalinowego.

Doktorant podkreśla, że tylko część przedstawionych prac jest wynikiem Jego działań. Wiele porównań bazuje na własnych pracach symulacyjnych oraz literaturowych badaniach eksperymentalnych.

Mimo, że tematyka pracy dotyczy zagadnień silnikowych, to Autor bardzo dużo uwagi poświęcił badaniom pozasilnikowym, jakim jest analiza zgodności wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych LES.

Recenzowaną pracę oceniam bardzo wysoko, gdyż ogólnie odpowiada postawionemu celowi pracy i jest dostosowana do obowiązujących w tym zakresie wymogów. Zadania badawcze przedstawiono już we Wprowadzeniu. Mimo tego, układ logiczny treści rozprawy jest dość przejrzysty, a prezentowane treści są ze sobą, oraz z układem rozpatrywanych zagadnień, dość dobrze powiązane.

Autor dokonał szerokiej prezentacji wyników swych rozważań zarówno teoretycznych, symulacyjnych oraz częściowo eksperymentalnych; opisał przeprowadzone badania oraz starał się nadać ich wynikom charakter danych przydatnych do zastosowań silnikowych.

Wnioski z przeprowadzonych analiz i badań są sformułowane trafnie i adekwatnie do ich zakresu i charakteru. Całość pracy cechuje staranna jej redakcja i poprawny styl pisarstwa (szczególnie, że pracę przedstawia się w języku angielskim). W zakresie omawianych zagadnień występują silne akcenty teoretyczne wywodzące się z dobrego rozeznania Autora w zakresie rozpatrywanej problematyki.

Najważniejsze osiągnięcia pracy, stanowiące o oryginalnym dorobku Doktoranta:

1. Sformułowanie ciekawego, wynikającego z praktycznego zastosowania, problemu dotyczącego wykorzystania modelowania LES w silnikach spalinowych.
2. Przedstawienie różnic w modelowaniu typu RANS oraz LES wpływające na postępowanie Autora podczas rozwiązywania postawionego problemu naukowego.
3. Wykonanie badań symulacyjnych w zakresie płomieni otwartych i zamkniętych oraz ich weryfikacja z badaniami eksperymentalnymi; wskazanie jakościowych różnic podczas analiz i weryfikacji modeli RANS i LES oraz między badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi.
4. Staranne i przejrzyste wykonanie pracy; poprawny język techniczny i konsekwencja w stosowaniu terminologii.

Budzi jednak pewien niedosyt lub zastrzeżenia kilka fragmentów rozprawy, które nie obniżają mojej ogólnej, pozytywnej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru tematu, uzasadnienia, analiz, przeprowadzonych badań symulacyjnych i ich zestawieniem z badaniami eksperymentalnymi oraz wnioskowania, itp.).

1. Główny nurt pracy jest skierowany na analizy modelowania z wykorzystaniem metod LES. Czy dodatkowe nakłady (intelektualne i fizyczne – moce obliczeniowe) w stosowanie metody LES równoważą lub przewyższają wyniki prac badawczych uzyskiwanych metodami RANS? Czy możliwe jest wskazanie wymiernych korzyści w modelowaniu LES i eksperymentach, które wykorzystując tę metodę zmieniły lub zmodyfikowały poglądy na procesy silnikowe??
2. W zakończeniu podrozdziału 4.1 dotyczącego palnika Bunsena wspomniano, że uzyskano dobre dopasowanie danych eksperymentalnych i symulacyjnych zarówno w ujęciu ilościowym i jakościowym. Proszę w takim razie wskazać kryteria tej dobrej zgodności obu typów badań. W pracy nie wskazano żadnych kryteriów tego porównania. Można domyślać się jedynie tej zgodności na podstawie przedstawionych wyników prac.
3. Jeśli teza pracy dotyczy zagadnień silników o zapłonie iskrowym, to dlaczego w niektórych rozdziałach Autor wprowadza analizy dotyczące silników ZS? Czy one również odnoszą się do tezy pracy? W jakim stopniu te zagadnienia umożliwiają jej potwierdzenie? W końcowych akapitach Autor wspomina o konieczności prowadzenia dalszych prac właśnie w odniesieniu do silników ZS, co sugeruje, że takich badań w pracy nie prowadzono?

4. Czy teza pracy powinna pojawiać się tak szybko? Przedstawienie jej po analizie literatury wskazuje na obszary nierozpoznane i wówczas jej zapis byłby logiczny (według recenzenta). Propozycja tezy pracy już w pierwszych akapitach pracy powoduje, że nie jest znany jej kontekst oraz geneza.
5. Dlaczego palnikowi Bunsena poświęcono tak wiele miejsca w pracy? Czy nie jest oczywiste, że spalanie w palniku (ze względu na sposób i rodzaj spalania) umożliwi uzyskanie spójnych wyników badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych? Czy prezentowane prędkości przepływu są skorelowane z wartościami pojawiającymi się w typowym silniku spalinowym?
6. Analiza symulacyjna LES dotycząca pól prędkości w cylindrze (rozdział 5) wskazuje na istnienie pewnych rozbieżności w kolejnych cyklach pracy silnika niezależnie od przyjętego modelu (Smagorinski lub RNG). W jaki sposób takie różnice wpływają na określenie np. niepewności średniego ciśnienia indykowanego – $CoV(p_i)$? Dysponując danymi dotyczącymi ciśnienia w cylindrze, w prosty sposób można określić zmienność średniego ciśnienia indykowanego. Wydaje się, że informacja o nierównomierności pracy silnika w wyniku analiz RANS oraz LES byłaby bardzo przydatna w ilościowym określeniu kryterium podobieństwa tych metod. Dlaczego nie zastosowano żadnych metod porównawczych tych systemów?
7. Większość prowadzonych prac symulacyjnych typu LES dotyczy badań wewnątrz-cylindrowych. Niestety takie warunki symulacyjne nie zostały porównane z odpowiednimi warunkami eksperymentalnymi. Autor nie przedstawił również prac innych autorów w takim zakresie.
8. Podsumowując, brak jest wskazania jednoznacznych kryteriów oceny porównawczej wskazującej na zbieżność rezultatów analiz RANS oraz LES. W literaturze przedmiotu istnieją pozycje, np. SAE 2020-01-2009, w których Autorzy także analizowali niektóre pola zmiennych (porównawczo AFR dla 100 cykli PIV z 10 cyklami LES). Gdyby Autor zaproponował wymierne kryteria porównawcze, wówczas aplikacyjność tej pracy byłaby bardzo duża.

2.2. Uwagi szczegółowe

Rozprawa jest starannie opracowana pod względem redakcyjnym i edytorskim oraz cechuje się dobrą czytelnością zamieszczonych rysunków. Zwraca uwagę łatwość poruszania się Autora w zagadnieniach teoretycznych procesu spalania. Terminologia stosowa-

wana w pracy jest poprawna i konsekwentnie przestrzegana. Poniżej przedstawiono wybrane uwagi szczegółowe:

Uwagi merytoryczne:

1. Kilka rozdziałów i podrozdziałów zatytułowano z zastosowaniem skrótów. Tak postąpiono z rozdziałem 3 – *GCM Combustion Model*. Jednak tego skrótu nie podano w spisie oznaczeń.
2. Str. 42. Równanie 3.01 nie jest w pełni prawidłowe. Jeśli podano po obu stronach zmienną S , to również pozostałe symbole powinny być zapisane.
3. Str. 16. Podano, że proces spalania zależy od turbulencji, mieszania, wtrysku i odparowania. Wydaje się, że kolejność procesów jest nieco inna: mieszanie występuje po wtrysku, a nie przed nim.
4. Str. 17. Autor opisując powyższe procesy wskazuje, że modele spalania podlegają ciągłemu rozwojowi. W tym miejscu podaje także 10 pozycji literaturowych [18-27]. Taki zapis jest bardzo dużym uproszczeniem, gdyż nie wskazuje ani autorów ani konkretnych rozwiązań, które analizowano w tych pracach.
5. Str. 21. Tabela 2. Czy przedstawione strategie dotyczą tylko modelowania procesów silnikowych? Czy podawanie gotowości wdrożenia modelowania typu LES do roku 2045 jest zasadne, jeśli rozwój silników już wcześniej zostanie znacząco ograniczony?
6. Str. 24. Dlaczego w modelu Smagorinskiego zapisano różne współczynniki C_s ? Podane różnice wynoszą ponad 80%. Czy takie różnice nie skutkują dość odmiennymi wynikami?
7. Str. 30. Z czego wynika zwiększenie gęstości (do $3,8 \text{ kg/m}^3$) podczas wypływu wodoru w zewnętrznej jego warstwie? Brak jest wyjaśnienia.
8. Str. 64. Dane zawarte na rys. 23 oraz 24 powinny być ze sobą spójne. Analiza wartości przy $\Phi = 0,4$ oraz $T = 318 \text{ K}$ nie wskazuje na taką spójność. Skąd więc różnice w wynikach badań? Czas opóźnienia samozapłonu dla metody LES wynosi 0,5 ms oraz 0,6? Przy metodzie RANS k-epsilon rozbieżności są znacznie większe (1 oraz 1,3)?
9. Str. 72. Podano pole rozkładu temperatury bez wskazania skali tego pola. Trudno jest uznać taką ilustrację za wartościową.

Uwagi edytorskie

1. Str. 16. Zamienne zapisy SI PFI oraz PFI SI.
2. Str. 21. Dlaczego Autor stosuje zapis równań 2.01? Czy numeracja 2.1 i dalsze byłaby błędna?
3. Brak jest numeracji stron w spisie tabel i rysunków.
4. Część bibliografii zawiera opis „No Title”. Trudno uznać takie publikacje za możliwe do weryfikacji.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy treści stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie naukowej *Inżynieria Mechaniczna*.

Temat dysertacji jest ważny w projektowaniu i eksploatacji silników spalinowych, a uzyskane wyniki mogą być już obecnie wykorzystane w praktyce modelowania i symulacji silników spalinowych. Równocześnie temat rozprawy jest niedostatecznie opisany w takiej postaci w literaturze, a sam sposób rozwiązania tematu jest oryginalnym pomysłem Autora i stanowi o dużej wartości pracy. Zadanie, którego podjął się Autor należy do trudnych, bowiem jego realizacja wymagała wykorzystania obszernego zakresu wiedzy teoretycznej oraz wielogodzinnego prowadzenia badań symulacyjnych z jednoczesnym uzyskaniem zadowalających korelacji z wynikami badań eksperymentalnych. Z tego powodu podjęcie się tak trudnego zadania przez Autora uważam za cenną wartość pracy.

W przedstawionym zadaniu naukowym Autor wykazał się samodzielnością w formułowaniu oryginalnych problemów i ich rozwiązywaniu oraz umiejętnością prowadzenia unikalnych badań symulacyjnych. Przeprowadzone rozważania teoretyczne i uzyskane wyniki badań modelowych i ich porównanie z wynikami eksperymentalnymi są przekonujące i w pełni potwierdzają postawiony w pracy cel.

Pod względem metodologicznym pracę uznaję za prawidłową. Autor potwierdził umiejętność formułowania tez, syntezy prowadzonych badań oraz analiz w sposób uporządkowany i metodyczny, a także prawidłowe podejście do interpretacji wyników. Na podkreślenie zasługuje również poziom redakcyjny i edytorski pracy oraz fakt jej publikacji w języku angielskim.

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

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa **mgra inż. Piotra Jaworskiego** pt. „**Numerical Simulation of Internal Combustion Engine Phenomena with LES Combustion Model**” spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2017 r. poz. 1789) w zw. z art. 179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 r. poz. 1669 z późn. zm).

Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgra inż. Piotra Jaworskiego do publicznej obrony ocenianej dysertacji.

