

Prof.dr hab.inż. Andrzej Teodorczyk  
Politechnika Warszawska  
Instytut Techniki Ciepłej  
ul. Nowowiejska 25, 00-665 Warszawa  
tel. 660-5226; fax. 8250-565  
e-mail: ateod@itc.pw.edu.pl

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Kruczka

pt. „Experimental and numerical investigation of combustion process of conventional and alternative fuels in Internal Combustion Engine ”

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechniki Śląskiej z dnia 4.01.2019

Recenzowana praca ma objętość 116 stron i oprócz treści zasadniczych zapisanych w pięciu rozdziałach, zawiera także wykaz literatury (169 pozycji), 2 załączniki oraz spis 48 rysunków i 13 tabel.

### 1. Wybór tematu rozprawy

Wybór obszaru badawczego obejmującego problematykę spalania paliw w silnikach tłokowych jest trafny i uzasadniony z uwagi na powszechne na świecie dążenie do dalszej poprawy sprawności silników i tym samym zmniejszenia emisji gazu cieplarnianego CO<sub>2</sub> oraz do zminimalizowania emisji szkodliwych dla zdrowia składników spalin, głównie tlenków azotu, CO, cząstek stałych i niespalonych węglowodorów.

Jednak tytuł rozprawy jest nietrafiony, jest on zbyt ogólny, nie precyzuje problemu naukowego zbadanego w rozprawie. Autor zapowiada w tytule badania procesu spalania w silniku tłokowym paliw konwencjonalnych i alternatywnych. Paliw konwencjonalnych jest dużo, zalicza się do nich benzynę, olej napędowy, alkohole, LPG i LNG. Paliw alternatywnych obejmujących oleje roślinne, biogazy, wodór i ich mieszaniny jest jeszcze więcej. Wszystkie wymienione paliwa nie były badane w rozprawie. Nie byłoby to zresztą celowe bo na przestrzeni lat większość z tych paliw zostało już szczegółowo przebadane.

Wiele chaosu zaistniało też w pracy w kwestii zdefiniowania jej celu badawczego. Najpierw cel pracy pojawił się we wprowadzeniu na str.5, jako zbadanie eksperymentalne i numeryczne różnic w spalaniu metanu i biogazu w silniku tłokowym. Potem w na str.6 za cel podano zrozumienie przyczyn emisji szkodliwych składników spalin i zlokalizowanie ich źródeł w spalaniu metanu i biogazu. Następnie na stronie 7 zamieszczono podrozdział „Objectives”, w którym napisano, że celem było zbadanie numeryczne CFD spalania,

propagacji płomienia i powstawanie szkodliwych składników spalin w komorze spalania silnika. Niecelowe jest powtarzanie wielokrotnie celu pracy, trochę innego za każdym razem i w miejscach przeznaczonych na inne treści, tzn. wprowadzenie czy motywacja do badań. Ponadto w punkcie „Objectives” wymieniono jako cele pracy czynności z warsztatu naukowego każdego badacza, takie jak zdobycie wiedzy na temat modelowania silników, dobór metod numerycznych do symulacji procesów, budowa stanowiska badawczego czy wybór metod modelowania. Cel pracy powinien zapowiadać oczekiwaną nowość naukową badań, a nie elementy procesu badawczego. W pracy nie ma też tezy badawczej.

## **2. Elementy nowości, oryginalność**

Przegląd literatury zagadnienia jest bardzo krótki (5 stron), ogólny, wielowątkowy i chaotyczny. Dotyczy spalania wszystkich paliw, ciekłych i gazowych, badań doświadczalnych i modelowania numerycznego. Jest w nim trochę o spalaniu paliw ciekłych, trochę o wzbogacaniu paliw gazowych wodorem, trochę o stuku, itp.. Przegląd ten jest zdecydowanie niewystarczający i niepotrzebnie tak ogólny. Istnieje przecież bardzo bogata literatura na temat spalania paliw gazowych, w tym metanu, w silnikach tłokowych ZI i ZS. Mniej jest opracowań dotyczących biopaliw gazowych, ale też jest ich sporo. Brakuje też w przeglądzie literatury prac polskich autorów na temat spalania metanu i biopaliw, w tym monografii Przybyły z roku 2015 i odwołania do licznych prac prezentowanych na cyklicznych krajowych konferencjach „Silniki gazowe” organizowanych przez Politechnikę Częstochowską. Z przeglądu wiedzy powinien wynikać wniosek o potrzebie podjęcia tematu realizowanego w rozprawie. A tu wynika tylko oczywisty wniosek, że dalsze badania są ważne i konieczne. A nie wynika, co już wiemy o spalaniu metanu i biogazów, a co wymaga dalszych badań.

W rozdziale 2 autor przedstawił przejrzyste metodykę badań doświadczalnych, w tym opis silnikowego stanowiska badawczego z modyfikacjami wykonanymi przez autora dla potrzeb tej rozprawy oraz procedury badawcze. Rozdział zawiera też wyniki badań doświadczalnych obejmujące przebiegi ciśnienia w cylindrze przy zasilaniu metanem i biogazem dla pięciu wartości współczynnika nadmiaru powietrza (0,95; 1,0; 1,05; 1,1 i 1,2) oraz dla trzech wartości kąta wyprzedzenia zapłonu (30, 35 i 40 deg przed GMP tłoka). Autor dokonał również pomiarów emisji z silnika CO, NO i niespalonych węglowodorów (HC) dla wymienionych wyżej paliw, wartości współczynnika nadmiaru powietrza i kąta wyprzedzenia zapłonu. Przebiegi ciśnienia w cylindrze i emisje porównał na wykresach, które są zbyt małe i przez to słabo czytelne. Kolory linii i ich rodzaje mało się różnią, co dodatkowo utrudnia analizę wykresów. Następnie, wykorzystując standardowy model termodynamiczny, autor

obliczył, na podstawie zmierzonych przebiegów ciśnienia, przebiegi w funkcji kąta obrotu wału korbowego temperatury w cylindrze, szybkości wywiązywania ciepła i udziału masowego ładunku spalonego. Następnie obliczył i przedstawił na wykresach sprawność objętościową silnika, średnie ciśnienie efektywne w cylindrze i sprawność cieplną silnika dla badanych gazów, zadanych wartości współczynnika nadmiaru powietrza i kąta wyprzedzenia zapłonu. Wykonane badania nie wnoszą nic nowego do wiedzy o spalaniu metanu i biogazu w silnikach tłokowych. Pokazują tylko znane zależności wpływu współczynnika nadmiaru powietrza i kąta wyprzedzenia zapłonu na zmierzone ciśnienie w cylindrze i obliczoną na tej podstawie temperaturę i szybkość wywiązywania ciepła oraz na zmierzony poziom emisji CO, NO i HC z badanego silnika. Przedstawione tendencje zmian są już znane z wielu innych badań wykonanych na innych silnikach. Zebrane dane mogą jednak stanowić materiał do walidacji kodów numerycznych używanych do symulacji procesów roboczych w silnikach tłokowych.

W rozdziale 3 autor przedstawił zbyt uproszczony moim zdaniem model geometryczny badanego silnika. Obecne konfiguracje i szybkości procesorów komputerów umożliwiają wykonywanie symulacji dla znacznie bardziej złożonych geometrii zapewniających większą dokładność wyników. Następnie autor przedstawił skrótowo modele matematyczne wykorzystywane w dwóch kodach numerycznych, które zastosował w pracy: ANSYS FLUENT i ANSYS FORTE. To był interesujący pomysł porównania skuteczności tych kodów w symulacji przebiegu procesu spalania w silniku, ponieważ różnią się one dość znacznie schematem numerycznym i wykorzystywanymi podmodelami. Autor nie ustrzegł się tutaj niedokładności w prezentacji równań, nie wyjaśnił np. znaczenia zmiennych  $\rho$ ,  $\tau$ ,  $u$ ,  $k$  bez znaku nad literą oraz  $z$  z kreską i falką nad nią. W równaniu (3.10)  $g$  oznacza siłę masową, a wcześniej było to przyspieszenie ziemskie. W kolejnym podrozdziale autor przedstawił szczegółowo stosowane modele spalania kinetycznego „C-equation ECFM” (FLUENT) i „G-equation” (FORTE) oraz modele zapłonu iskrowego Zimonta (FLUENT) i „Discrete Particle” (FORTE), a także szczegółowe ustawienia solverów.

Kolejny podrozdział 3.6 jest zaskakująco zatytułowany „Metody matematyczne”, podczas gdy dotyczy on zero-wymiarowego (0D) modelu termodynamicznego procesu roboczego w cylindrze. Opisany tu model i wykonane nim obliczenia przebiegu ciśnienia i temperatury w funkcji kąta obrotu wału korbowego w cylindrze są standardowo stosowane w praktyce silnikowej. Ich wartość naukowa jest znikoma, zdecydowanie nie na poziomie doktorskim. Takie modele są używane w dydaktyce, są one dostępne w podręcznikach (Fergusson<sup>1</sup>, Rychter<sup>2</sup>) lub jako aplikacje internetowe (Rychter<sup>3</sup>). Ten fragment pracy jest zbędny.

---

<sup>1</sup> Ferguson C.R., Kirkpatrick A.T.: Internal Combustion Engines, John Wiley & Sons, 2001

<sup>2</sup> Rychter T.J., Teodorczyk A.: Modelowanie matematyczne roboczego cyklu silnika tłokowego, PWN, 1990

Rozdział 4 stanowi najbardziej wartościową merytorycznie część rozprawy i zawiera wyniki analiz numerycznych spalania w silniku tłokowym i porównanie z własnymi badaniami doświadczalnymi. Na wstępie autor przeprowadził symulacje procesu sprężania i rozprężania bez spalania przy użyciu dwóch kodów FLUENT i FORTE i porównał na rys.4.1 obliczeniowe przebiegi ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego z eksperymentem. Bardzo zaskakujący jest wynik symulacji dla kodu FLUENT, odbiegający znacząco od eksperymentu i kodu FORTE. Tak duża rozbieżność stawia pod znakiem zapytania prawidłowość symulacji w kodzie FLUENT.

Następnie autor przeprowadził symulacje w kodzie FLUENT przy użyciu 3 różnych modeli spalania, ale dla geometrii 2D. Wyniki przebiegu ciśnienia dla wszystkich modeli bardzo odbiegają od eksperymentu, co nie dziwi, ponieważ model 2D nie może oddać rzeczywistych warunków. Przedstawiona w rozprawie dyskusja trzech modeli spalania jest interesująca i poprawna merytorycznie, ale nie mająca oparcia w wynikach symulacji, gdyż one pokazują, że wszystkie modele nie dają poprawnych wyników. Można więc postawić tu tylko tezę, że analiza 2D nie wnosi nic wartościowego do pracy i może być pominięta.

Na kolejnym rysunku (4.2) autor przedstawił porównanie symulacji 3D wykonanych w kodach FLUENT i FORTE oraz eksperymentu wraz ze szczegółową analizą różnic w przebiegu ciśnienia w cylindrze.

W podrozdziale 4.2.2 autor przedstawił ważny problem zmienności laminarnej prędkości spalania w stosowanych modelach spalania i wpływu na turbulentną prędkość płomienia. Dla metanu i wielu innych paliw kody numeryczne CFD zawierają tablice wartości laminarnej prędkości spalania dla różnych temperatur, ciśnień i stechiometrii. Dla biogazu brak jest tych tablic, co wymaga przygotowania własnych danych, albo w postaci tablic, albo odpowiednich korelacji. Autor wykonał obliczenia laminarnej prędkości spalania przy użyciu programu CHEMKIN i mechanizmu chemicznego GRIMech 3.0 dla szerokiego zakresu temperatur, ciśnień i stechiometrii. Dodatkowo obliczył także wpływ recyrkulacji spalin. O ile zastosowanie mechanizmu GRIMech dla metanu nie budzi zastrzeżeń to użycie go dla biogazu wymagało uzasadnienia, czego zabrakło w pracy. Wyniki przedstawione na rys.4.3 dla temperatury 900 K są pozbawione sensu fizycznego ponieważ dla metanu temperatura samozapłonu wynosi 810 K, jak więc można rozpatrywać laminarną prędkość spalania w mieszance, która spala się objętościowo bez płomienia. W analizie tej brakuje także porównania z wartościami eksperymentalnymi.

W kolejnym etapie badań autor badał zmienność laminarnej prędkości spalania w warunkach silnikowych (rys.4.4). Nie jest tu jasne jak uśredniana była wartość laminarnej prędkości spalania. Stwierdzenia, że laminarna prędkość spalania jest bardziej uzależniona od ciśnienia czy temperatury są spekulacjami nie popartymi argumentami. Widoczne na

---

<sup>3</sup> Rychter T., Teodorczyk A.: Teoria silników tłokowych, WKiŁ, 2006

wszystkich wykresach na rys. 4.4 pulsacje laminarnej prędkości spalania w okolicy  $370^\circ$  wydają się mieć charakter numeryczny ponieważ brak dla nich uzasadnienia fizycznego. Podobne pulsacje pojawiają się później w podobnym miejscu na wykresach dla turbulentnej prędkości spalania (rys.4.5).

W kolejnych częściach rozprawy autor przedstawia porównanie obliczonych w kodzie numerycznym i obliczonych na podstawie zmierzonego w silniku przebiegu ciśnienia wartości udziału paliwa spalonego i temperatury.

Ostatnia część pracy zawiera porównanie obliczonych i zmierzonych emisji CO, HC i NO. Wyniki symulacji CO i NO w stopniu zadowalającym są zgodne z pomiarami, ale dla HC różnią się zasadniczo, co może świadczyć o błędach w modelowaniu.

Rozdział 4.3.4 o zaskakującym tytule „Numeric” przedstawia obliczeniowe wartości emisji CO, NO i HC w funkcji kąta obrotu wału korbowego.

Dużym niedociągnięciem pracy jest brak analizy wrażliwości wyników symulacji na zmianę wielkości numerycznej siatki obliczeniowej.

Rozprawa zakończona jest obszernym podsumowaniem omawiającym jej zawartość, osiągnięcia pracy oraz wnioski końcowe.

Nowością naukową recenzowanej rozprawy jest wykazanie możliwości zadowalających jakościowo analiz numerycznych przebiegu spalania i powstawania emisji toksycznych składników spalin w silniku tłokowym zasilanym metanem i biogazem. Nowością jest też porównanie możliwości obliczeniowych dwóch pakietów, FLUENT i FORTE.

Zamierzony przez autora cel rozprawy wymagał zaprojektowania eksperymentu, budowy stanowiska badawczego, dobrania i opanowania metod pomiarowych, przeprowadzenia pomiarów oraz przeanalizowania i opracowania wyników. Cel ten wymagał także opanowania zaawansowanych kodów numerycznych, przeprowadzenia złożonych symulacji numerycznych, opracowania i analizy wyników oraz ich walidacji w oparciu o dane eksperymentalne. Mimo wskazanych licznych błędów i niedociągnięć cel ten został osiągnięty i uzyskane wyniki stanowią oryginalny dorobek naukowy autora.

Rozprawa napisana jest zrozumiałym językiem angielskim, z poprawną terminologią naukowo-techniczną. Jest zwięzła i konkretna. Edycja pracy i jej szata graficzna mają wiele niedociągnięć wskazanych poniżej. W szczególności niezadowalające są wykresy, za małe, o złą kolorystyce i złym doborze rodzajów linii, utrudniających ich odczytywanie.

Reasumując, oceniam dostatecznie postawienie problemu badawczego, metodologię przeprowadzonych badań oraz analizę i interpretację ich wyników.

### 3. Uwagi krytyczne i pytania

1. Streszczenie: dlaczego używa się terminu „współczynnik nadmiaru tlenu” – czy spalanie jest w czystym tlenie?
2. Streszczenie: „porównanie emisji zanieczyszczeń dla przypadków najwyższej wydajności”, „negatywnie wpływa na wydajność” – o jakiej wydajności mowa?
3. Str.11 – wiele pozycji literatury (np. [88], [156], [15]) dotyczy paliw ciekłych, które nie są tematem rozprawy
4. Str.18 – zamiennie w pracy mowa jest o CNG i metanie, a to nie to samo
5. Str.18 – jaki był stopień sprężania obliczony dla modelu CAD silnika?
6. Str.22 – jak obliczano temperaturę w cylindrze (rys.2.5)?
7. Str.23 – równanie (2.1) jest błędne, lewa i prawa strona mają różne jednostki
8. Str.24 – jak obliczano szybkość wywiązywania ciepła (HRR)?
9. Str.25 – podpis pod rysunkiem informuje o zmierzonej szybkości wywiązywania ciepła – czy faktycznie była mierzona?
10. Str.26 – z czego wynika wyższa sprawność dla biogazu niż dla metanu?
11. Str.30 – duże uproszczenia geometrii modelu CAD silnika mogą dawać inną objętość komory spalania i stopień sprężania, czy znane są te różnice
12. Str.30 – jak oceniano jakość elementów siatki obliczeniowej?
13. Str.40 – brak definicji wielkości  $S_{L,ref}$  i  $S_L^0$
14. Str.45 – czym różni się schemat „second order” od „quasi second order”?
15. Str.49 – równanie (3.34) nie zawiera T
16. Str.56 – “ignition in eddy dissipation is initiated by the combustion products” – w programie FLUENT zapłon nie jest zależny od modelu spalania, jest inicjowany od małej objętości gazu o wysokiej temperaturze
17. Str.57 – „this model is ignited and controlled by combustion products” – model nie może być zapalany od produktów, w jaki sposób model jest sterowany przez produkty spalania?
18. Str.17 – skoro symulowany jest jeden suw sprężania i rozprężania to jak jest uwzględniany wewnętrzny EGR?
19. Str.58, rys.4.2 – dlaczego podczas sprężania w eksperymencie ciśnienie różni się dla przypadków ze spalaniem i bez niego?
20. Str.58 – czy przedmuch do skrzyni korbowej przez pierścienie może dać spadek ciśnienia w cylindrze o 10-12 bar? Co na to literatura?
21. Str.59 – „results were also compared to literature findings in work [54,142]” – szkoda, że tego nie pokazano na rys.4.3. Poza tym dane w [54] są dla  $T < 660$  K, a w [142] dla  $T < 450$  K.
22. Str.60 – wszystkie książki na temat spalania podają, że laminarna prędkość spalania osiąga maksimum dla mieszanek lekko przebogaconych ( $\Phi = 1.05$ ). W

obliczeniach autora jest to dla mieszanek stechiometrycznych. Skąd ta rozbieżność?

23. Str.64, 2d – „This is caused by lower heat losses during combustion” – płomień jest wolniejszy, jest więcej czasu na wymianę ciepła – powinno więc być odwrotnie.
24. Str.65, rys.4.6, 4.7 – wszystkie wielkości pokazane są obliczane, nie ma mierzonych
25. Str.67 – brak skali kolorów dla MFB
26. Str.71 – na rys. 4.12 i 4.13 porównane są temperatury obliczone w kodzie CFD i obliczone z modelu termodynamicznego na podstawie zmierzonego ciśnienia w cylindrze. Kod CFD oblicza przestrzenny rozkład temperatury, który następnie został uśredniony na potrzeby tego porównania. Jak to zrobiono? Wbrew temu co pisze autor nie ma tu porównania z rzeczywistością oraz nie ma dobrej zgodności.
27. Str.77, rys.4.16, 4.17 – brak skali kolorów dla emisji CO
28. Str.80 – jaki mechanizm chemiczny był używany do symulacji powstawania NO<sub>x</sub>. Rysunek 4.19 przedstawia tylko NO, natomiast rys.4.21 i 4.22 pokazują rozkłady NO<sub>x</sub>. Jakie inne tlenki azotu w tym się zawierają?
29. Str.81, rys.4.20, 4.21 – brak skali kolorów dla emisji NO. Na rysunkach 4.20 i 4.21 zaskakuje brak tlenków azotu w strefie płomienia (wysoka temperatura), jak można to wytłumaczyć?
30. Spis literatury jest zasadniczo sporządzony alfabetycznie wg pierwszego autora, ale niestety brak w tym konsekwencji, np. [24], [30], [64], [66], [68]

#### Uwagi edytorskie:

Lp.	Strona	Jest	Winno być
1	Streszczenie	40, 35, 30 OWK	40°, 35°, 30° OWK
2	Streszczenie	uwalniania ciepła	wywiązywania ciepła
3	Streszczenie	ciśnienie skuteczne	ciśnienie efektywne
4	Streszczenie	poziomy emisji	poziomy emisji CO, NO, HC
5	Streszczenie	czystego metanu	metanu
6	3, 1d	creation	formation
7	4, 9g	with careful a validation	with careful validation
8	19, 6d	start of spark	spark advance
9	51, 2g	substrates	reactants
10	64, 6g	slower	lower
11	68, 14d	Fig. 4.11	Fig. 4.10
12	68, 9d	Fig. 4.10	Fig. 4.11
13	83, 8g	molar content	mole fraction

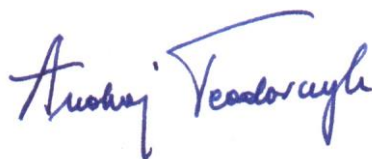
Uwagi krytyczne, w szczególności edytorskie, załączam, aby zachęcić autora w przyszłości do większej staranności w opracowywaniu wyników badań i pisaniu rozpraw naukowych.

#### **4. Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że autor przeanalizował ciekawy problem naukowy, przeprowadził własne oryginalne badania doświadczalne i symulacje numeryczne, przeanalizował krytycznie wyniki oraz sformułował wnioski.

Doktorant wykazał opanowanie warsztatu naukowego i umiejętność prowadzenia samodzielnych badań naukowych, doświadczalnych i numerycznych, analizy wyników i wnioskowania. Doktorant posiadał umiejętność napisania rozprawy naukowej.

Reasumując, uważam, że pomimo wskazanych niedociągnięć, rozprawa spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach i tytule naukowym i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, reading "Andrzej Teodorczyk". The signature is written in a cursive, flowing style.

Warszawa, 28 lutego 2019