



**Silesian University  
of Technology**

SILESIAAN UNIVERISTY OF TECHNOLOGY  
FACULTY OF ENERGY AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING  
INSTITUTE OF THERMAL TECHNOLOGY

PhD dissertation

**Experimental and numerical investigation of  
combustion process of conventional and alternative  
fuels in Internal Combustion Engine**

Gliwice, December 2018

---

**Author:**

Grzegorz Kruczek  
Silesian University of Technology  
Faculty of Energy and Environmental Engineering  
Institute of Thermal Technology  
ul. Konarskiego 22  
44-100 Gliwice  
Poland  
website: [www.itc.polsl.pl/gkruczek](http://www.itc.polsl.pl/gkruczek)  
e-mail: [Grzegorz.Kruczek@polsl.pl](mailto:Grzegorz.Kruczek@polsl.pl)

**Advisor:**

dr hab. inż. Wojciech Adamczyk  
Silesian University of Technology, Gliwice, Poland

**Reviewers:**

1st reviewer: Prof. dr hab. inż. Andrzej Teodorczyk  
Politechnika Warszawska, Warszawa, Poland

2nd reviewer: Dr hab. inż. Zdzisław Stelmasiak, prof. ATH  
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku Białej, Bielsko Biała, Poland

First edition

Copyright © 2018, Grzegorz Kruczek  
Institute of Thermal Technology  
Silesian University of Technology

---

## Streszczenie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych oraz numerycznych dotyczących procesu spalania paliwa konwencjonalnego i alternatywnego w silniku spalinowym. Szczególny nacisk położono na badanie parametrów pracy silnika, potencjalnych źródeł emisji oraz walidację modelu numerycznego na podstawie badań eksperymentalnych. W pracy poza wykorzystaniem zaawansowanych technik obliczeniowych bazujących na numerycznej mechanice płynów (ang. Computational Fluid Dynamics) przedstawiono także budowę modelu empirycznego opartego na podstawowych zależnościach termodynamicznych. W rozprawie doktorskiej na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych oraz numerycznych przeanalizowano proces powstawania szkodliwych związków oraz porównano krzywe parametrów pracy silnika ZI zasilanego metanem oraz biogazem.

W pierwszym etapie prac przeprowadzono rozbudowę stanowiska pomiarowego w celu jego przystosowania do wymaganych standardów pomiarowych. W tym celu jednocylindrowy silnik badawczy (Hermann Ruf IG 10) został wyposażony w układ przygotowania oraz wtrysku paliwa płynnego i gazowego, układ chłodzenia, system kontroli prędkości obrotowej, układ sterowania silnikiem oraz nowoczesne systemy pomiarowe połączone z aplikacją do gromadzenia danych pomiarowych. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla pięciu wybranych współczynników nadmiaru tlenu (0.95, 1.00, 1.05, 1.10, 1.20), a także trzech kątów wyprzedzenia zapłonu (40, 35, 30 OWK przed GMP). W wyniku tych prac zbudowano obszerną bazę danych, gdzie do przeprowadzonej analizy pracy silnika wykorzystano:

- ciśnienie i temperaturę wewnątrz cylindra,
- szybkość uwalniania ciepła,
- stopień wypalenia paliwa,
- sprawność objętościową,
- wewnętrzne ciśnienie skuteczne,
- wewnętrzną sprawność cieplną,
- poziomy emisji.

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazano spadek mocy wyjściowej dla biogazu, którego przyczyną była niższa sprawność objętościowa i wartość opałowa spalanego paliwa. Ponadto sprawność cieplna wykazała wyższe wartości dla biogazu w warunkach stechiometrycznych oraz wartości  $\lambda = 1.05$ . W przypadku spalania metanu zaobserwowano wzrost sprawności dla wyższych wartości  $\lambda$ , co sugeruje, że spalanie ubogie jest bardziej odpowiednie dla czystego metanu. Porównanie emisji zanieczyszczeń dla przypadków najwyższej wydajności wykazało, że poziomy CO i HC są podobne dla obu paliw, jednak wartości NOx są znacznie niższe w przypadku

---

paliwa biogazowego. Główną przyczyną takich zjawisk jest obecność w paliwie dwutlenku węgla, które znacząco obniża temperaturę spalania wewnątrz cylindra. Dlatego wysoka zawartość dwutlenku węgla podobnie wpływa na proces spalania jak recyrkulacja spalin. W związku z tym możliwe jest usunięcie urządzeń EGR, które uprościłoby budowę silnika. Co więcej, proces recyrkulacji znacznie obniża sprawność objętościową silnika, co negatywnie wpływa na wydajność i moc wyjściową. Z drugiej strony znacznie wolniejsze spalanie biogazu prowadzi do wyższej emisji HC dla warunków ubogich ( $\lambda = 1.2$ ) w porównaniu do metanu. Czas spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze jest zbyt długi, co powoduje spalanie podczas suwu rozprężania silnika spalinowego zasilnego biogazem. Kolejny etap badań został poświęcony opracowaniu modelu matematycznego w celu oceny dokładności, stosowalności i przydatności istniejących modeli matematycznych. Model oparty był na pierwszej i drugiej zasadzie termodynamiki z dodatkowymi empirycznymi modelami stosowanymi do modelowania stopnia wypalenia paliwa, przepływu ciepła przez ściany i szacowania masy wewnątrz cylindra. Głównym problemem napotkanym podczas prac w tym etapie był wybór modeli empirycznych, które dokładnie przewidywałyby wszystkie rozważane procesy. W związku z tym zbadano grupę modeli przeznaczonych do silników z zapłonem iskrowym, a najdokładniejsze zostały wykorzystane w dalszych badaniach. Wyniki wykazały słabą zgodność pod względem dokładności przewidywania ciśnienia. Z drugiej strony model odwzorowuje ogólne tendencje dla różnych parametrów wejściowych. Dlatego też takie podejście można wykorzystać do wstępnej i ogólnej analizy. Główną zaletą takiego podejścia jest szybkość obliczeń, ponieważ czas obliczeń jest mierzony w sekundach. Na koniec przeprowadzono symulacje numeryczne dla wszystkich badanych przypadków. Praca obejmowała budowę modeli w dwóch różnych oprogramowaniach, w tym powszechnie stosowanego Ansys Fluent i niedawno wprowadzonego, dedykowanego silnikom spalinowym, Ansys Forte. Pierwszy z nich wykorzystuje metodę objętości skończonych (z ang. Finite Volume Method) i model równania C w przypadku spalania, który jest szeroko stosowany dla różnych przypadków. Drugie oprogramowanie wykorzystuje nowe podejście wykorzystujące technikę IBM-ALE (z ang. Immersed Boundary Method – Arbitrary Lagrangian-Eulerian), która znacznie upraszcza proces modelowania ruchomych elementów silnika. Ponadto do symulacji procesu spalania i powstawania zanieczyszczeń wykorzystano model równania G z dokładnym mechanizmem kinetycznym. Dodatkową zaletą stosowania IBM-ALE jest znaczna redukcja czasu obliczeniowego dzięki możliwości zastosowania siatki o mniejszej liczbie elementów. Wstępne wyniki pokazały, że Ansys Forte dokładniej przewiduje zjawiska wewnątrz cylindra w porównaniu do Ansys Fluent, stąd do dalszych badań wykorzystano Ansys Forte.

Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwoliły zrozumieć mechanizmy leżące u podstaw procesów zachodzących wewnątrz silnika otrzymane z wyników eksperymentalnych. Początkowo testowano model 2D w połączeniu z różnymi modelami spalania. Wyniki pokazały, że tylko model z równaniem C był zdolny do przewidywania spalania wewnątrz cylindra. W związku z tym opracowano w pełni model 3D w Ansys Fluent, którego wyniki były niezadowolające. Główną wadą był brak informacji dotyczących emisji. Ponadto ciśnienie w cylindrze podczas suwu sprężania było przeszac-

---

wane, a faza zapłonu i faza płomienia pojawiły się wcześniej w porównaniu z danymi eksperymentalnymi. Z drugiej strony wyniki Ansys Forte wykazały dobrą zgodność podczas kompresji. Ciśnienie podczas spalania było wyższe w porównaniu z danymi eksperymentalnymi, jednak dodatkowe zastosowanie przedmuchu i staranny dobór parametrów modelu spalania znacznie poprawiły wyniki. W związku z tym opracowano dokładny model 3D w Ansys Forte i zwalidowano za pomocą danych eksperymentalnych dla warunków stechiometrycznych i kątu wyprzedzenia zapłonu 35 stopni obrotu wału korbowego przed górnym martwym zapłonem. Podczas procesu walidacji zestaw parametrów modelu spalania został dobrany tak, by wyniki modelu numerycznego pokrywały się z wynikami eksperymentalnymi. Następnie, obliczenia dla pozostałych przypadków przeprowadzono przy użyciu zachowanych parametrów z przypadku walidacji. Celem było zbadanie wrażliwości modelu na różne warunki pracy (tj. stosunek nadmiaru tlenu i kąt wyprzedzenia zapłonu). Ponadto zbadano przyczynę i miejsce powstawania NOx i CO podczas spalania w ICE. Dlatego też Ansys Reaction Design Chemkin jest uwzględniony w procesie numerycznym Ansys Forte, w którym zastosowano zredukowany kinetyczny mechanizm chemiczny GRI-MECH 3.0 do symulacji reakcji chemicznych zachodzących w komorze. Wyniki serii obliczeń dla różnych warunków porównano z wynikami eksperymentalnymi. Ponadto przedstawiono wizualizację procesu powstawania NOx i CO oraz propagację frontu płomienia w przekroju przez cylinder.

Przeprowadzone symulacje wykazały bardzo dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi dla rozpatrywanych przypadków. Badania niezawodności, powtarzalności i stabilności rozwiązania dla różnych warunków pracy doprowadziły do wniosku, że na wyniki uzyskane z modelu spalania (równania G) w dużej mierze wpływają skład mieszanki paliwowej i laminarne prędkości spalania. Jednak dla wybranego paliwa model jest wrażliwy tylko na większe współczynniki nadmiaru tlenu. W przypadku biogazu dla  $\lambda = 1.2$  i  $\lambda = 1.1$  uzyskano znaczące rozbieżności w wynikach ciśnienia wewnątrz cylindra dla modelu i eksperymentu. Dlatego w celu uzyskania poprawnych wyników, odpowiednio zmodyfikowano i dostosowano parametry modelu spalania. Powodem tego były obliczone prędkości laminarnego płomienia, którego walidacja nie została przeprowadzona. Ponadto wyniki były rozbieżne w porównaniu z wynikami literaturowymi dla większego współczynnika nadmiaru tlenu. Dodatkowo model zapłonu wykazał zależność od czasu zapłonu. Analiza propagacji frontu płomienia wykazała, że początkowa faza rozwoju płomienia jest silnie zależna od przepływu płynu wewnątrz cylindra. W przypadku biogazu płomień we wczesnej fazie rozwoju płomienia został zniekształcony przez strukturę przepływu, co doprowadziło do dłuższego czasu spalania, mniejszej sprawności, mocy wyjściowej, powtarzalności cykli, a w niektórych przypadkach wyższej emisji HC i CO w wyniku niecałkowitego i niepełnego spalania. Badania dotyczące powstawania zanieczyszczeń doprowadziły do interesujących wyników. W przypadku CO, jego proces tworzenia zachodzi natychmiast z frontem płomienia w wyniku procesu utleniania metanu, podczas gdy powstawanie NOx jest opóźnione w czasie. Jest to głównie związane z chemią i warunkami wewnątrz cylindra. Najwyższe zawartości zanieczyszczeń zaobserwowano w pobliżu świecy zapłonowej. Dlatego ob-

---

nizenie temperatury w miejscu zapłonu ma kluczowe znaczenie dla zmniejszenia emisji.

Podsumowując, paliwo biogazowe wykazuje pewne zalety w porównaniu do paliwa metanowego, głównie pod względem redukcji emisji. Ponadto badanie procesu spalania wykazało ogólny zakres dalszych ulepszeń, głównie w zakresie fazy wczesnego rozwoju płomienia dla paliwa biogazowego. Paliwo pochodzące z fermentacji beztlenowej okazało się być dobrą alternatywą dla paliw kopalnych, zwłaszcza dla stacjonarnych silników spalinowych.