

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Badania symulacyjne procesu spalania paliwa gazowego w silniku tłokowym

Lukasz Grabowski

Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska
email: l.grabowski@pollub.pl

STRESZCZENIE: Paliwa gazowe odpadowe powstają jako produkty uboczne wielu procesów technologicznych. Ich skład umożliwia zasilanie silników agregatów prądotwórczych. Takie działanie ma na celu obniżenie ogólnej emisji spalin oraz zwiększenie efektywności energetycznej procesów produkcyjnych. Może również stanowić dodatkowe, zabezpieczające przedsiębiorstwo źródło energii elektrycznej w przypadku W zależności od składu paliwa wartość opałowa może zawierać się w przedziale 30-40 MJ/kg. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań modelowych wykonanych w programie AVL Boost silnika stacjonarnego o zapłonie iskrowym zasilanego gazami odpadowymi. Celem badań było określenie parametrów pracy umożliwiających uzyskanie maksymalnej sprawności ogólnej silnika. Jako kryterium przyjęto jednostkowe zużycie paliwa. Obiektem badań był niedoładowany silnik czterocyldrowy o pojemności skokowej równej 2 dm³. Wykonano badania osiągow silnika w zakresie prędkości obrotowej 2000-5000 obr/min przy pełnym otwarciu przepustnicy. Następnie wykonano badania silnika dla jednej prędkości obrotowej w pełnym zakresie obciążeń. Uzyskana optymalna prędkość obrotowa wału korbowego wynosi 3000 obr/min, przy mocy efektywnej równej 43 kW.

SŁOWA KLUCZOWE: silnik, spalanie, modelowanie, paliwo gazowe

1. Wprowadzenie

Paliwa gazowe odpadowe powstają jako produkty uboczne wielu procesów technologicznych. Ich skład umożliwia zasilanie tłokowych silników spalinowych agregatów prądotwórczych. Takie działanie ma na celu obniżenie ogólnej emisji spalin oraz zwiększenie efektywności energetycznej procesów produkcyjnych. Może również stanowić dodatkowe, zabezpieczające przedsiębiorstwo źródło energii elektrycznej w przypadku

Modelowanie jest szeroko opisywane w silnikowej literaturze naukowej [1-2]. Zaletą przy zastosowaniu silnikowych modeli zerowymiarowych jest krótki czas obliczeń w porównaniu z modelami trójwymiarowymi (CFD). Metoda ta oparta jest o zasadę zachowania masy i zasadę zachowania energii w całym modelowanym elemencie (np. przewodzie dolotowym lub cylindrze).

Odwzorowanie modelowe procesów zachodzących w silniku spalinowym umożliwia m.in. analizę dynamiki układu korbowego lub wyznaczenie parametrów czynnika w cylindrze dla zdefiniowanych warunków pracy [3-4]. W pracy [5] przedstawiono model silnika opracowany w środowisku Modelica. Określono szczegółowo strukturę wymieniając wszystkie zjawiska, których odwzorowanie matematyczne niezbędne jest do prawidłowego opracowania modelu silnika. Według autorów modelowanie jest niezbędne podczas prac projektowych zarówno samego silnika jak i układów zasilania.

Jednym z takich programów do modelowania procesów silnikowych jest AVL BOOST. AVL BOOST jest wielopoziomowym systemem obliczeniowym z możliwością pracy w czasie rzeczywistym [6], przeznaczonym do symulacji zmiennych warunków pracy silnika. AVL BOOST zawiera podstawowe komponenty

silnikowe zapewniające możliwie najwyższą elastyczność w projektowaniu silników. Modelowanie odbywa się w następującym zakresie:

- strumień gazu: właściwości gazu, kolektor dolotowy, filtr powietrza, cylinder, kompresor, turbina itd.,
- wymiana ciepła: chłodzenie silnika, wymiana ciepła przez ścianki cylindra,
- obciążenie mechaniczne silnika: wał, przelozenia, odbiór mocy,
- otoczenie sterujące: charakterystyki/mapy wtrysku paliwa, regulatory PID,
- projektowanie eksperymentu.

2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy było opracowanie modelu oraz wykonanie badań modelowych silnika zasilanego gazami odpadowymi. Określono parametry pracy silnika umożliwiające uzyskanie maksymalnej sprawności ogólnej silnika. Jako kryterium przyjęto jednostkowe zużycie paliwa.

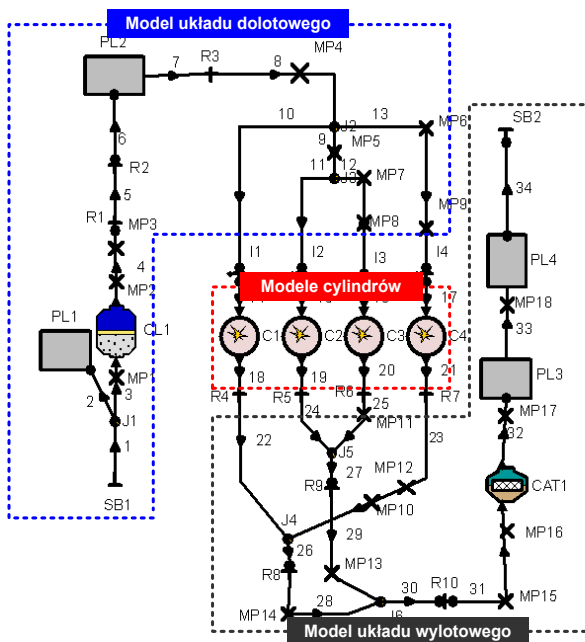
Pierwszym etapem badań było opracowanie modelu w programie AVL BOOST. Wymagało to wprowadzenia takich danych jak: parametry geometryczne silnika, fazy rozrządu, zdefiniowanie modelu wymiany ciepła oraz modelu procesu spalania. Następnym etapem było wprowadzenie danych dotyczących paliwa będącego mieszaniną węglowodorów. Steżania procentowe molowe składników przedstawiono w tab. 1.

W kolejnym etapie wykonano obliczenia oraz opracowano charakterystyki prędkościowe i obciążeniowe w celu określenia optymalnych warunków pracy pod kątem jednostkowego zużycia paliwa.

Tabela 1. Stężenia procentowe molowe składników paliwa

Składnik	% mol
metan	7,57
etan	16,83
etylen	6,41
propan	15,80
i-pentan	4,40
i-butan	12,88
n-butan	3,86
wodór	32,25

Obiektem badań była niedoładowana czterocyldrowa jednostka napędowa o pojemności skokowej równej 2 dm³. Model silnika przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model silnika w programie AVL BOOST

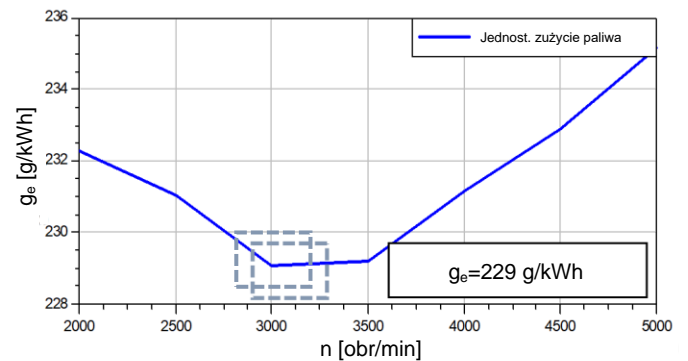
3. Wyniki badań

W celu określenia optymalnego punktu przy zdefiniowanym przepływnie paliwa gazowego wynoszącym 11 kg/h opracowano charakterystyki obciążeniowe silnika. Głównym zadaniem było znalezienie optymalnego punktu pracy silnika o zapłonie iskrowym. Umożliwiło to zdefiniowanie takiego punktu pracy, aby zminimalizować jednostkowe zużycie paliwa.

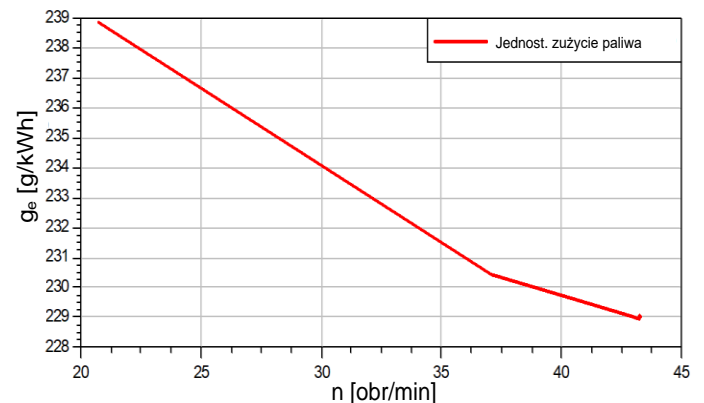
Końcowym etapem było wykonanie badań osiągow silnika w zakresie prędkości obrotowej 2000-5000 obr/min przy pełnym otwarciu przepustnicy. Następnie wykonano badania silnika dla jednej prędkości obrotowej w pełnym zakresie obciążeń. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 2-3.

Uzyskane jednostkowe zużycie paliwa zostało przedstawione jako funkcja prędkości obrotowej wału korbowego. Najniższe wartości otrzymano w zakresie od 3000 do 3500 obr/min. Wartość zmienia się od 229 g/kWh do 236 g/kWh.

W przypadku jednostkowego zużycia paliwa przedstawionego jako zależność od mocy efektywnej generowanej na wale silnika uzyskano zmiany w zakresie od 239 do 229 g/kWh. Obliczenia przeprowadzono dla mocy od 20 do 45 kW (rys. 3).



Rys. 2. Zależność jednostkowego zużycia paliwa w funkcji prędkości obrotowej



Rys. 3. Zależność jednostkowego zużycia paliwa od generowanej mocy efektywnej

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że przy godzinowym zużyciu odpadowego paliwa gazowego równym 11 kg/h silnik powinien pracować z prędkości obrotową wału korbowego równą 3000 obr/min. Uzyskiwana moc efektywna wynosi 42 kW, sprawność ogólna silnika 30%, jednostkowe zużycie paliwa 229 g/kWh. Zakres zmian zużycia paliwa w zależności od mocy efektywnej lub prędkości obrotowej nie przekracza 10 g/kWh. Jednak w przypadku pracy ciągłej silnika obejmującej około 2000 godzin rocznie 10 g/kWh, przy mocy efektywnej 43 kW przełoży się to na 860 kg paliwa.

Literatura

- [1] Zengqiang Z., i in., *Experimental evaluation of performance of heavy-duty SI pure methanol engine with EGR*, Fuel, vol. 325, 2022.
- [2] Anderson P., *Intake Air Dynamics on a Turbocharged SI-Engine with Wastegate*. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping 2002.
- [3] Izweik H. T.: *CFD Investigations of Mixture Formation, Flow and Combustion for Multi-Fuel Rotary Engine*. Technischen Universität Cottbus, 2009.
- [4] Kopeć S. Witek A.: *Modelowanie i analiza dynamiki zespołu wału korbowego silnika spalinowego*. Komisja Budowy Maszyn PAN – Oddział w Poznaniu, Vol. 26 nr 2 Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji 2006.
- [5] Batteh J., Tiller M., Newman Ch.: *Simulation of Engine Systems in Modelica*. 3rd International Modelica Conference, November 3-4, 2003, Simulation of Engine Systems in Modelica, pp. 139-148.
- [6] Bellér G., Árpád I., Kiss J., Kocsis D.: *AVL Boost: a powerful tool for research and education*, Journal of Physics: Conference Series, 2021.