

Analiza wskaźników energetycznych i emisyjnych silnika tłokowego zasilanego mieszaniną biogazową

The analysis of energy and emission indicators of piston engine supplied by a mixture of biogas

DANIEL STĘPNIAK
JAN SURWIŁO
PIOTR LAMPART *

Materiały z XX SKWPWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.192

W niniejszym artykule przedstawiono metodykę oraz wyniki badań dotyczących eksperymentalnego generowania i spalania paliw ciekłych typu diesel w silniku tłokowym o zapłonie samoczynnym. Zwrócono uwagę na zmienność parametrów pracy silnika uruchamianego w trybie biegu jałowego oraz pod obciążeniem. Dokonano analizy zmienności temperatury w poszczególnych cylindrach, w zależności od rodzaju generowanego paliwa wykorzystywanego do jego zasilania. Przeprowadzono dokładną analizę jakościową i ilościową spalin przy wykorzystaniu jako paliwa substytutu biogazu o różnych proporcjach metanu i dwutlenku węgla. Określony został charakter zmian składu spalin, w tym cząstek CO, CO₂, NO_x w zależności od obciążenia silnika zasilanego różnymi paliwami.

SŁOWA KLUCZOWE: silniki tłokowe, paliwa niskokaloryczne, biogaz, emisja CO i CO₂, emisja NO_x

This paper presents the methodology and results of research focused on experimental investigation of generation and combustion of liquid fuels in a combustion piston engine. The study highlights the variability of exhaust gases parameters produced by the engine running in an idle mode and in a generation mode. The experimental analysis includes research about variability of temperatures in the cylinders, depending on the type of fuel used to supply the engine. The qualitative and quantitative analysis of exhaust gases extends on biogas substitutes with different proportions of methane and carbon dioxide. Characteristics were created depending on the composition of exhaust gases, including particulate CO, CO₂, NO_x, for a range of engine load and fuel composition.

KEYWORDS: piston combustion engine, low caloric fuels, biogas, CO and CO₂ emission, NO_x emission

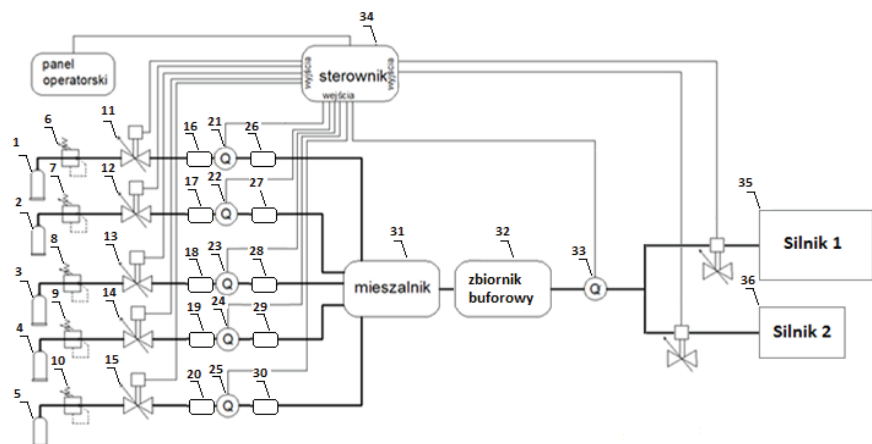
W pracy silnika głównym monitorowanym parametrem jest stosunek nadmiaru powietrza. Służy on do prawidłowego zadania wartości otwarcia przepustnic regulujących przepływ mieszanin paliwo-powietrznych lub przepływ samego powietrza. Dodatkowo monitorowane są parametry, które jednoznacznie określają czystość spalin. Są to: temperatura spalin w tłumiku, zawartość O₂ oraz zawartość CO_x i NO_x. Ostatnie dwa świadczą o stopniu dopalenia i prawidłowym przebiegu reakcji spalania w cylindrze. Oszacowanie zawartości CO_x i NO_x jest kluczowe ze względu na spełnienie norm czystości spalin, które dopuszczają jednostkę prądowtórczą do

pracy w obszarze swojego przeznaczenia. Dokonując analizy parametrów energetycznych, zwraca się przede wszystkim na sprawność, moc oraz jednostkowe zużycie paliwa dla różnych przypadków mocy oraz obciążenia, pod którym pracuje jednostka w danej chwili. Wielkości te są ściśle powiązane z konstrukcją silnika, aparatury zasilającej w paliwo oraz aparatury sterującej i pomiarowej odpowiedzialnej za kontrolę procesu zasilania.

Kompleksowe badania silników tłokowych, uwzględniające analizę jakościową i ilościową spalin oraz analizę parametrów energetycznych poszczególnych jednostek energetycznych, dostarczają wielu danych. Służą one usprawnieniu istniejących oraz stworzeniu nowych rozwiązań technologicznych z zakresu aparatury sterująco-monitorującej, jak również dokładniejszych i bardziej precyzyjnych układów zasilających. Na etapie ich projektowania są brane pod uwagę przede wszystkim aspekty ekonomiczne oraz ekologiczne [1÷5].

Stanowisko badawcze

W skład stanowiska badawczego wchodzi: wiązki butlowe z gazami, podgrzewacz, mieszalnik oraz armatura z urządzeniami sterująco-pomiarowymi, znajdujące się w strefach zagrożonych wybuchem, poza obszarem hal laboratoryjnym. W bezpośrednim sąsiedztwie znajduje się przestrzeń dla agregatorów oraz aparatury monitorująco-sterującej, stanowiąca strefę bezpieczną. Stacja mieszania na drodze dozowania w odpowiednich proporcjach substratów (takich jak metan, wodór, tlenek węgla, dwutlenek węgla oraz azot) wytwarzać będzie mieszaninę paliwową o zmiennej wartości



Rys. 1. Schemat układu zasilającego do wytwarzania mieszanin niskokalorycznych typu syngaz, gdzie: 1÷5 – zbiorniki z gazem; 6÷10 – zawory; 11÷15 – reduktory; 16÷20 – zbiorniki kompensacyjne; 21÷25 – przepływomierze, termopary, czujniki ciśnienia; 26÷30 – zbiorniki kompensacyjne; 31 – mieszalnik; 32 – zbiornik buforowy; 34 – sterownik; 35, 36 – silniki [6]

* Mgr inż. Daniel Stępniaak (dstepniak@imp.gda.pl); mgr inż. Jan Surwiłło (j.surwilo@imp.gda.pl); dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. IMP PAN (lampart@imp.gda.pl) – Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Ośrodek Energetyki Ciepłej, Zakład Turbin

opałowej oraz o natężeniu przepływu zależnym od obciążenia (rys. 1). System ma za zadanie zasilanie agregatu prądowłórczego ZGT-60/D/MA/PE (Mielec-Diesel) o mocy nominalnej $P = 60$ kVA.

Do obsługi oraz komunikacji z jednostką prądowłórczą posłużono się zaimplementowanym w urządzeniu sterownikiem elektronicznym UNIGEN, zarządzającym pracą zespołu. Poszczególne moduły sterownicze układu zasilającego umożliwiły monitorowanie oraz kontrolę parametrów pracy związanych z układem zapłonowym, regulacją składu mieszanki i regulacją prędkości obrotowej. Do oceny spalin posłużono się analizatorem spalin Testo 330 [7], umożliwiającym analizę ilościową oraz jakościową składu strugi produktów spalania. Monitorowano parametry świadczące o czystości spalin: O_2 , CO , CO_2 , NO_x nadmiar powietrza λ [-], temperaturę spalin i powietrza. W celu podłączenia sondy pomiarowej wykorzystano węzownicę wykonaną z przewodu rurowego ze stali nierdzewnej, o wymiarach $12 \times 1,5$ mm, i długości $L = 2,5$ m. Umieszczona została w kanale wylotowym spalin, tuż przed tłumikiem, umożliwiając wyprowadzenie pewnej ilości spalin i gwarantując ciągłość przepływu spalin przy odpowiednio dobranych parametrach temperatury oraz ciśnienia gazów dolotowych.

Metodyka wykonywanych badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne zostały podzielone w zależności od rodzaju paliwa, którym była zasilana jednostka silnikowa. W pierwszej serii pomiarowej posłużono się czystym metanem. Na kolejnych etapach badań wykorzystano mieszaniny paliwowe, w skład których wchodziły metan oraz dwutlenek węgla. Dla przypadku zasilania silnika substytutem biogazu badania podzielono na kilka serii pomiarowych, w zależności od procentowych udziałów poszczególnych substratów: 70% $CH_4/30\%$ CO_2 – mieszanina 1, 60% $CH_4/40\%$ CO_2 – mieszanina 2, 50% $CH_4/50\%$ CO_2 – mieszanina 3, 40% $CH_4/60\%$ CO_2 – mieszanina 4, 30% $CH_4/70\%$ CO_2 – mieszanina 5. Ze względu na zastosowanie w części mieszalnikowej instalacji przepływomierzy masowych konieczne było przeliczenie poszczególnych udziałów objętościowych mieszanin na udziały masowe:

$$m_i = v_i \mu_i / \mu_m \quad (1)$$

$$\mu_m = \sum v_i \mu_i \quad (2)$$

gdzie: m_i – udział masowy składnika i [-], v_i – udział objętościowy składnika i [-], μ_i – masa cząsteczkowa składnika i [g/mol], μ_m – masa cząsteczkowa mieszaniny [g/mol].

Dla każdego z paliw oraz dla każdej serii pomiarowej jednostkę prądowłórczą badano w trakcie działania na biegu jałowym oraz w trybie pracy pod obciążeniem – odpowiednio o mocach: 11 kW, 17 kW, 22 kW, 28 kW, 38 kW – o charakterze rezystancyjnym w postaci nagrzewnic. Pomiarów poszczególnych wskaźników pracy silnika dokonywane były w odstępach czasu nie krótszych niż $t = 5$ min od momentu zmiany obciążenia oraz zmiany paliwa – z uwagi na bezwładność czasu stabilizacji parametrów, jaką można zaobserwować w trakcie regulacji maszyny. We wszystkich przypadkach regulacja parametru otwarcia przepustnicy była przeprowadzana do osiągnięcia stabilnej wartości stopnia nadmiaru powietrza $\lambda = 1,32$ [-].

Wyniki i ocena rezultatów badań

Biorąc pod uwagę zmienność temperatury w poszczególnych cylindrach w zależności od obciążenia, pod jakim

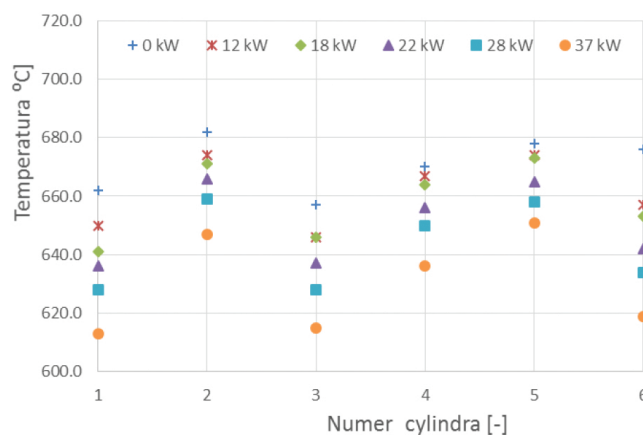
pracuje silnik, łatwo zauważalna jest tendencja spadku temperatury wraz ze zwiększającą się liczbą załączanych nagrzewnic.

Sposób kształtowania się różnicy temperatur w poszczególnych cylindrach można tłumaczyć różnicą powierzchni wymiany ciepła, która jest największa w okolicach zewnętrznych cylindrów (cylindry 1 i 6) (tabl. 1, rys. 2, 3).

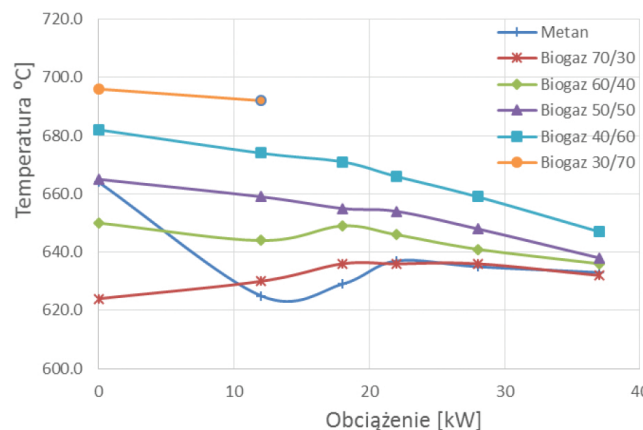
Udział cząstek NO_x w spalinach maleje wraz ze wzrostem udziału CO_2 . Wynika to z faktu, że duża ilość gazu inertne-

TABLICA I. Temperatury w poszczególnych cylindrach silnika zasilanego różnymi paliwami pod różnym obciążeniem

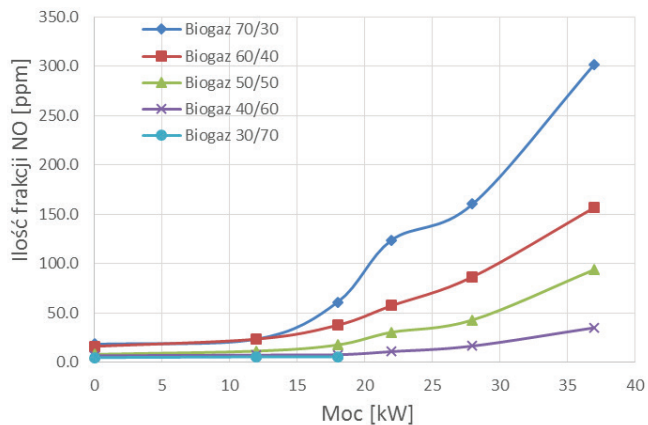
Rodzaj paliwa	Obciążenie [kW]	Temperatura w poszczególnych cylindrach					
		1	2	3	4	5	6
		[°C]					
Metan	0	661	664	647	670	654	666
	11	615	625	609	625	622	626
	17	617	629	608	626	626	624
	22	615	637	608	625	632	621
	28	612	635	604	625	631	619
	37	605	633	603	622	630	609
Biogaz 60/40	0	641	650	638	652	644	654
	11	627	644	621	635	643	636
	17	625	649	619	635	648	634
	22	622	646	618	635	646	629
	28	616	641	613	633	642	620
	37	609	636	606	627	638	612
Biogaz 40/60	0	662	682	657	670	678	676
	11	650	674	646	667	674	657
	18	641	671	646	664	673	653
	22	636	666	637	656	665	642
	28	628	659	628	650	658	634
	37	613	647	615	636	651	619



Rys. 2. Zmienność temperatury w poszczególnych cylindrach silnika zasilanego mieszaniną biogazową 40/60 pod różnym obciążeniem

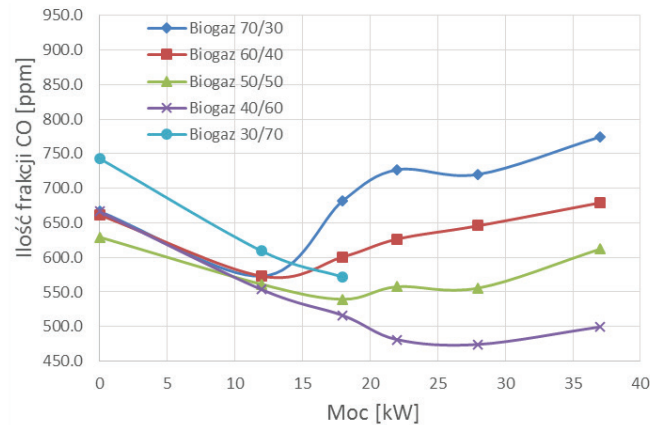


Rys. 3. Zmienność temperatury w cylindrze nr 2 w zależności od składu spalanego paliwa



Rys. 4. Zawartość frakcji NO w spalinach dla różnych warunków pracy silnika

go powoduje rozcieńczanie mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrze. Badany silnik nie jest jednostką doładowaną i z tego powodu ilość zasysanego powietrza jest mniejsza niż w przypadku mieszanki bogatej. W procesie spalania objętościowo bierze udział mniejsza ilość azotu. Dodatkowo duża ilość energii cieplnej wydzielanej podczas procesu spalania jest przekazywana na podgrzanie CO_2 . Tym samym mniejsza ilość atomów azotu ulega utlenieniu. Ilość NO wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia silnika. Maksymalna odnotowana ilość NO kształtuje się na poziomie 300 ppm przy obciążeniu $P = 38 \text{ kW}$ i zasilaniu jednostki mieszanką wysoce kaloryczną Biogaz 70/30. Przy pracy silnika w trybie biegu jałowego wartość ta nie zmienia się znacznie w zależności od rodzaju mieszanki i osiąga $10 \div 30 \text{ ppm}$ (rys. 4). Najwyższa wartość CO zawarta w spalinach sięga poziomu 800 ppm przy obciążeniu maksymalnym i dla bogatej mieszanki. Zawartość tych



Rys. 5. Zawartość frakcji CO w spalinach dla różnych warunków pracy silnika

cząstek spada wraz ze wzrostem ilości CO_2 w paliwie. Ilość zanieczyszczenia wzrasta wraz ze wzrostem mocy generowanej przez silnik. Wartość minimalna nie spada poniżej 500 ppm. Przy pracy na biegu jałowym obserwujemy niestabilną zależność ilości CO (rys. 5).

Dzieje się tak dlatego, że na biegu jałowym silnik nie jest sterowany regulatorem głównym, lecz regulatorem biegu jałowego, który jest odpowiedzialny za ustawienie jednego parametru poziomu otwarcia przepustnicy gazu.

Reasumując: ilość tlenków rośnie wraz ze wzrostem mocy generowanej przez silnik. Wartości te rosną również ze wzrostem zawartości metanu w paliwie.

Wnioski

Zmiana różnicy temperatur w pojedynczym cylindrze, przy zasilaniu silnika różnymi paliwami, przyjmuje charakter spadkowy wraz ze wzrostem obciążenia, które zostaje podłączone do agregatu prądowłórczego.

Badania wykazały, że skład paliwa ma wpływ na skład i czystość spalin. Podobny wpływ ma moc generowana w danym momencie.

Największą wartość ilości NO w spalinach otrzymujemy dla mieszanki bogatej, czyli takiej, gdzie zawartość metanu wynosi 70%. Wartość ta waha się w zależności od obciążenia i przyjmuje wartości $20 \div 300 \text{ ppm}$. Podobną zależność obserwujemy dla zawartości tlenu węgla. Dla mieszanki bogatej wartości te zamykają się w przedziale $600 \div 800 \text{ ppm}$.

LITERATURA

- D. Stępnik, J. Surwiło. „Analiza wskaźników energetycznych i emisyjnych podczas pracy silnika tłokowego zasilanego mieszanką syngazową”, opr. wewn. IMP PAN nr 256/2015, Gdańsk, s. 41, 2015.
- D. Stępnik, J. Surwiło. „Badania eksperymentalne spalania mieszanki syngazowej w silniku tłokowym”, opr. wewn. IMP PAN nr 313/2015, Gdańsk, s. 32, 2015.
- B. Sahoo, N. Sahoo, U. Saha. “Effect of H₂:CO₂ ratio in syngas on the performance of a dual fuel diesel engine operation”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 49, pp. 139–146, 2011.
- G. Przybyła, A. Szlęk, Ł. Ziółkowski. “The lean mixture combustion of simulated producer gas in SI engine”, *Journal of KONES Institute of Aviation*, Vol. 20, No. 3 2013, pp. 331–338.
- G. Przybyła, A. Szlęk, Ł. Ziółkowski “Assessment of the Performance of a Small Capacity SI Engine Fuelled with Model Lean Mixture of Biogas,” *Int. J. Thermodyn.*, Vol. 16, No. 4, pp. 179–188, 2014, nr ISSN 1301–9724.
- B. Skarpetowski, D. Stępnik, J. Koronowicz, P. Lampart, Ł. Jędrzejewski. „Opracowanie projektu stacji syngazowej stworzonej na potrzeby zasilania silnika o zapłonie iskrowym”, opr. wewn. IMP PAN nr 166/2012, s. 16, Gdańsk, 2012.
- www.testo.com.pl, [Online], [Accessed: 19-Mar-2016].

TABLICA II. Zestawienie wartości mierzonych parametrów pracy silnika zasilanego różnymi mieszankami biogazowymi

	Moc [kW]	Temperatura spalin [°C]	% CO ₂	CO [ppm]	NO [ppm]	λ [-]
Biogaz 70/30	0	32.06	5.18	666.56	18.32	1.33
	11	22.97	5.12	572.97	23.57	1.32
	17	34.29	5.15	682.18	60.96	1.32
	22	32.12	5.02	726.88	123.81	1.31
	28	33.76	5.08	720.18	160.18	1.32
Biogaz 60/40	37	37.46	5.12	774.33	301.49	1.32
	0	22.56	5.10	661.57	16.19	1.32
	11	22.97	5.12	572.97	23.57	1.32
	17	24.71	5.15	600.78	37.63	1.33
	22	26.40	5.08	626.50	57.36	1.32
Biogaz 50/50	28	28.97	5.15	645.82	86.56	1.32
	37	31.79	5.16	678.99	156.56	1.33
	0	23.63	5.10	629.36	8.07	1.32
	11	25.37	5.09	561.09	11.43	1.32
	17	27.68	5.14	539.57	17.65	1.32
Biogaz 40/60	22	29.67	5.05	557.69	30.44	1.31
	28	32.60	5.19	555.67	42.91	1.33
	37	36.46	5.18	612.05	93.77	1.33
	0	23.49	5.10	666.27	6.71	1.32
	11	27.15	5.09	553.48	7.34	1.32
Biogaz 30/70	17	29.15	5.16	516.11	7.75	1.33
	22	33.61	5.19	481.21	10.88	1.33
	28	35.52	5.17	474.16	16.57	1.33
	37	39.19	5.15	499.50	34.96	1.32
	0	26.61	5.11	743.28	4.85	1.32
Biogaz 30/70	11	29.70	5.05	609.31	5.58	1.31
	17	34.60	5.09	571.58	5.68	1.32
	22	-	-	-	-	-
	28	-	-	-	-	-
	37	-	-	-	-	-