

Marek FLEKIEWICZ, Paweł FABIŚ

OCENA WPLYWU MIESZANINY DME I LPG NA OSIĄGI SILNIKA ZI

Streszczenie. Niniejsze opracowanie jest kontynuacją prowadzonego przez autorów programu badań nad aktywatorami spalania alternatywnych paliw gazowych, wykorzystywanych do napędu pojazdów samochodowych. Zaprezentowano w nim wybrane parametry dynamiczne samochodu napędzanego mieszaniną LPG i eteru dwumetylowego, którego udział masowy zawierał się w zakresie od 5 do 26%. Dla każdej z mieszanin określono również zużycie energii oraz sprawność jej przetworzenia w układzie napędowym badanego pojazdu, napędzanego czterocylindrowym silnikiem o pojemności skokowej 1.6 dm³.

Słowa kluczowe. DME, LPG, mieszaniny, paliwa alternatywne

THE EFFECTS OF BLENDING DIMETHYL ETHER WITH LPG ON ENGINE OPERATION AND EFFICIENCY

Summary. This paper present is continuing of research programme about gaseous fuels combustion activators which are used for vehicle feeding. The article presented chosen vehicle dynamic parameters gained by mixing LPG and DME for range of mixture from 5 up to 30%. The vehicle was powered by 1.6 SI engine adapted to gaseous fuels feeding. The work presents results of used energy and it convert efficiency at the driveline system fitted four cylinders SI engine with 1.6 cm³ capacity.

Keywords. DME, LPG, mixtures, alternative fuels

1. WPROWADZENIE

Wzrost zainteresowania eterem metylowym – DME, jako paliwem alternatywnym do napędu pojazdów samochodowych jest przede wszystkim spowodowany możliwością jego wytwarzania z wielu źródeł, takich jak: gaz ziemny, węgiel, biomasa, a także ług czarny, czyli półpłynny, wysokoenergetyczny produkt uboczny w przemyśle celulozowym. Ponieważ

DME cechuje bardzo wysoka liczba cetanowa, większość obecnie prowadzonych prac badawczo-rozwojowych i wdrożeniowych dotyczy jego wykorzystania do zasilania silników ZS. Mając jednak na uwadze fakt, iż własności fizykochemiczne DME są podobne do LPG, jest on również mieszany z LPG i używany jako paliwo dla domowych urządzeń grzewczych oraz silników gazowych, napędzających generatory i pompy ciepła [1]. Łatwość mieszania LPG i DME i wykorzystania tej mieszaniny jako suplement lub też zamiast LPG, sprzyja zarówno dywersyfikacji paliw, jak i zwiększeniu bezpieczeństwa energetycznego [2].

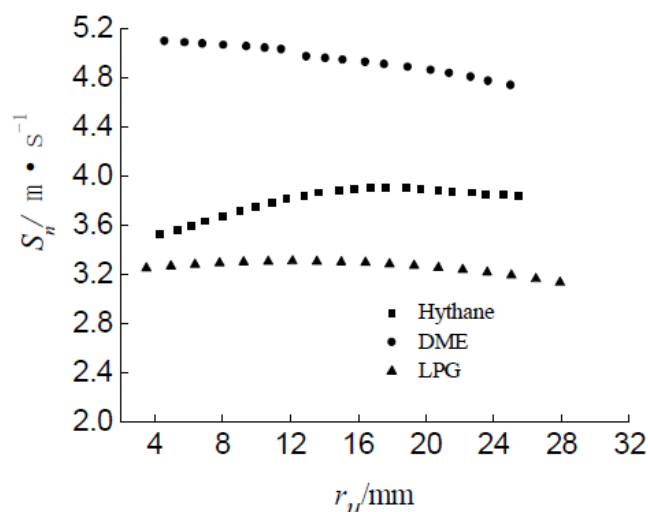
DME jest wykorzystywane jako dodatek przyspieszający rozpalanie wielu paliw zasilających silniki ZS, dwupaliwowe oraz HCCI [3]. Badania silnika ZI zasilanego mieszaniną DME i n-butanu przeprowadził Lee S., wyznaczając charakterystyki zewnętrzne i poziomy emisji składników toksycznych spalin [4]. Uzyskane wyniki wykazały znaczny wpływ niższej wartości opałowej DME na rozwijany przez silnik moment obrotowy i jednostkowe zużycie paliwa. Wyniki zaprezentowane przez Lee S. potwierdziły wnioski sformułowane na podstawie badań symulacyjnych, które przeprowadzono w laboratoriach Wydziału Transportu [5]. W badaniach tych określono wpływ mieszanin DME i propanu oraz DME i n-Butanu na przebieg procesu spalania, stwierdzając, że spalanie paliwa z 10% dodatkiem DME przebiega podobnie jak LPG. Chen Z. wraz z zespołem badawczym przeprowadził natomiast badania stacjonarnego silnika ZI, przeznaczonego dla systemu mikrokogeneracji, zasilając go mieszaninami LPG i DME, o udziale masowym DME od 5 do 40% [6]. Wyniki otrzymane w tych badaniach stanowiły podstawę do opracowania algorytmów sterowania procesem spalania, przede wszystkim w zakresie kontroli spalania detonacyjnego, opierając się na sygnałach standardowego czujnika spalania detonacyjnego i kontroli prądu jonizacji. Badania te wykazały ponadto, że napędzając silnik mieszaniną LPG-DME:

- możliwe jest uzyskanie mocy rozwijanej dla silnika napędzanego wyłącznie LPG,
- możliwy jest rozruch zimnego silnika zasilanego mieszaninami zawierającymi od 5 do 10% DME, bez jakichkolwiek modyfikacji układu zasilania,
- opóźnienie zapłonu i zmiana współczynnika nadmiaru powietrza zapewnia pracę silnika bez spalania stukowego, gdy jest on zasilany mieszaninami zawierającymi do 25% DME,
- w spalinach silnika występuje duża koncentracja DME i formaldehydu, a także węglowodorów NMHC, które są redukowane standardowym układem oczyszczania spalin.

Mając na uwadze rozbudowaną w Polsce infrastrukturę LPG wprowadzenie tej mieszaniny nie jest ograniczone barierami technicznymi. Jediną przeszkodą jest przygotowanie mieszanin DME i gazów ropopochodnych w fazie produkcji lub bezpośrednio przed jej dostarczeniem do sieci stacji. Przy udziale ponad 2 mln pojazdów zasilanych LPG w naszym kraju i rocznym zużyciu LPG na poziomie 1,77 mln ton wprowadzenie mieszaniny DME i skroplonych gazów ropopochodnych z udziałem masowym DME tylko w zakresie od

5 do 15% może przyczynić się do obniżenia zużycia, rosnącego w cenie LPG, emisji składników toksycznych spalin oraz CO₂.

Wśród wielu czynników, które skłoniły autorów niniejszego artykułu do podjęcia prac nad wykorzystaniem eteru dwumetylowego do zasilania silników ZI należy wyróżnić jego bardzo istotną cechę, wpływającą na skrócenie czasu rozpalania mieszaniny powietrzno-gazowej, a którą można umownie nazwać aktywatorem procesu spalania. Duża prędkość spalania DME przyspiesza inicjację spalania mieszaniny LPG i DME, podobnie jak wodór w mieszaninie z gazem ziemnym (rys. 1).



Rys. 1. Szybkość spalania gazu ziemnego wzbogaconego wodorem, DME i LPG w zależności od promienia rozprzestrzeniającego się płomienia [7]

Fig. 1. Flame speed versus radius for Hythane®, DME and LPG

Biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy oraz wyniki badań symulacyjnych, przeprowadzonych przez autorów przy wykorzystaniu oprogramowania GT Power, przystąpiono do realizacji projektu, obejmującego swym zakresem wykorzystanie DME, jako paliwa dla silników ZI i ZS [5,8,9]. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań stanowiskowych uzyskanych dla samochodu Opel Astra, którego silnik napędzано mieszaninami LPG i DME o udziale masowym DME od 5 do 26%.

2. CHARAKTERYSTYKA PALIWA WYKORZYSTANEGO W BADANIACH

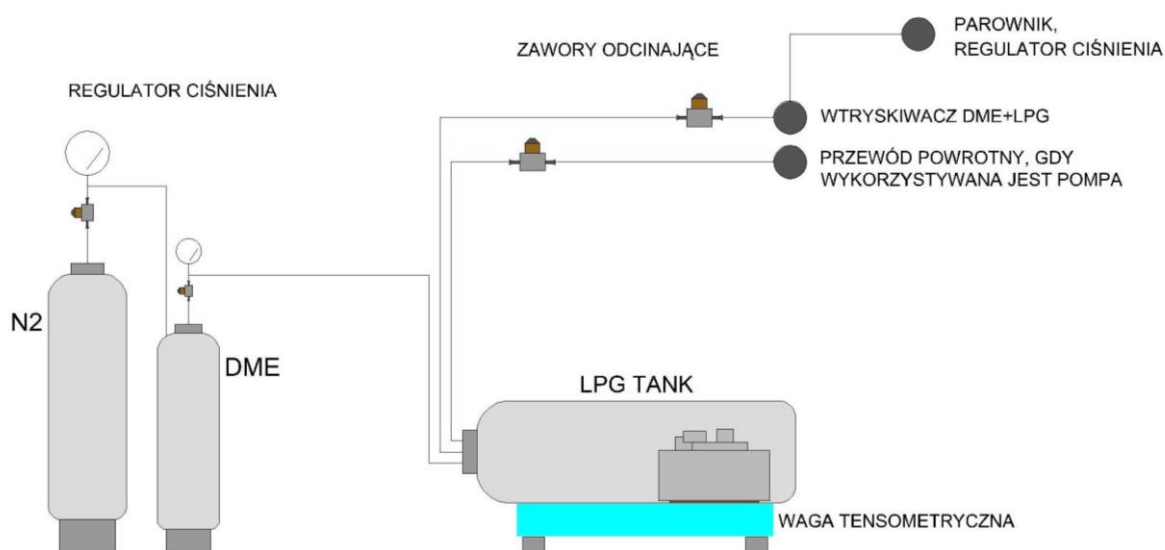
Wykorzystywane obecnie paliwa silnikowe są mieszaniną węglowodorów o bardzo szerokim zakresie temperatury wrzenia. W tabeli 1 porównano wybrane paliwa alternatywne, uwzględniając ich temperatury wrzenia. Paliwami o niskiej temperaturze wrzenia są metan i wodór. Podobną temperaturę zapłonu do wodoru mają propan i butan oraz eter

dwumetylowy (DME). DME ma temperaturę wrzenia odpowiadającą mieszaninie gazów ropopochodnych, a jego wysoka liczba cetanowa zapewnia jego wykorzystanie do zasilania silników ZS. Gęstość DME i gazów ropopochodnych jest podobna zarówno w fazie skroplonej, jak i lotnej, a niewielkie ciśnienie pozwala na jego magazynowanie w fazie skroplonej, w temperaturze otoczenia. Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza dla DME jest najniższe spośród wszystkich paliw gazowych, co wynika z zawartego w tym paliwie tlenu. W konsekwencji wartość opałowa mieszaniny DME i LPG dostarczanej do silnika jest stała, pomimo wzrastającego udziału masowego DME.

Tablica 1

Porównanie własności fizykochemicznych wybranych paliw alternatywnych

Parametr	Metan	Eter dwumetylowy	Wodór	n-Butan	Propan
	CH ₄	CH ₃ OCH ₃	H ₂	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈
Masa cząsteczkowa [g/mol]	16,4	46,07	2,02	58,12	44,09
Gęstość [g/cm ³]	0,720	0,661	0,090	0,578	0,5
Temperatura wrzenia [°C]	-162	-24,9	-252,9	-0,5	-42
Liczba oktanowa	130	-	130	92	105
Liczba cetanowa	-	55-60	-	10	5
Wartość opałowa [MJ/kg]	50,2	28,8	121,0	45,72	46,30
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza [kg/kg]	17,2	9,0	34,2	15,46	15,88
Temperatura zapłonu [°C]	540-650	350	400	405	470
Prędkość spalania [cm/s]	30-33,8	42,9-61	min. 271	41	45,0
Wskaźnik Wobbe [MJ/m ³]	54	52	48	91	81



Rys. 2. Układ przygotowania mieszanki LPG i DME

Fig. 2. Scheme of stand for preparation mixture of LPG and DME

W prowadzonych badaniach wykorzystano mieszanki, które wytworzono za pomocą specjalnego stanowiska, rys. 2, mieszanie gazów przeprowadzano w ściśle określonej kolejności, przygotowując w ten sposób mieszanki LPG i DME o następujących udziałach masowych:

- 5% DME, 95% LPG,
- 11% DME, 89% LPG,
- 17% DME, 83% LPG,
- 21% DME, 79% LPG,
- 26% DME, 74% LPG,
- 100% LPG (mieszanka propanu butanu w proporcji 40/60).

Tak przygotowane mieszanki wprowadzono do odpowiednio skonfigurowanego układu zasilania, stanowiącego układ dodatkowego wyposażenia badanego samochodu. Układ ten dostarczał odparowaną mieszaninę gazów do kanałów dolotowych badanego silnika.

3. OBIEKT BADAŃ I STANOWISKO BADAWCZE

Obiektem prowadzonych badań był samochód OPEL Astra napędzany silnikiem ZI o pojemności 1600 cm³, przystosowany do zasilania alternatywnym paliwem gazowym. Zasadnicze dane charakteryzujące silnik badanego samochodu przedstawia tabela 2.

Tabela 2

Charakterystyczne parametry silnika napędzającego obiekt badań

Liczba i układ cylindrów	4 R
Moc maksymalna i odpowiadająca jej prędkość obrotowa	55 kW / 5200 1/min
Moment maksymalny i odpowiadająca mu prędkość obrotowa	128 Nm / 2800 1/min
Pojemność skokowa	1598 cm ³
Średnica cylindra	79,0 mm
Skok	81,5 mm
Stopień sprężania	9,6

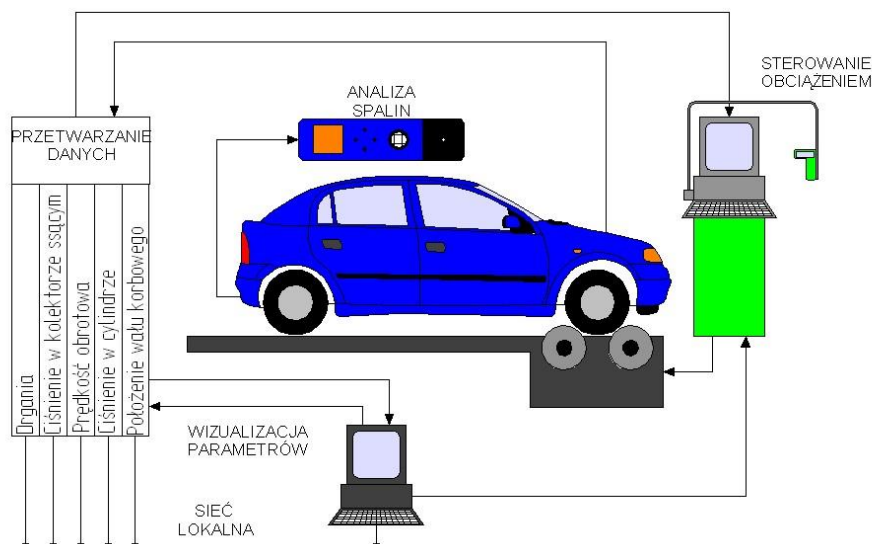
Osiągi samochodu określono analizując jego charakterystyki dynamiczne, wyrażające zależność mocy rozwijanej na kołach od prędkości samochodu, które uzyskano za pomocą hamowni podwoziowej firmy Bosch typu FLA 203, dla przygotowanych wcześniej mieszanin, o różnym udziale masowym DME. Uproszczony schemat stanowiska przedstawiono na rys. 3.

Stanowisko badawcze wyposażono również w przetworniki i czujniki zapewniające identyfikację stanu pracy silnika. Podstawowe układy kontrolno-pomiarowe, zapewniające ciągłą rejestrację stanu pracy silnika, stanowiły między innymi urządzenia umożliwiające pomiar:

- ciśnienia w cylindrach silnika,
- kąta obrotu wału korbowego wraz z określeniem GMP tłoka,
- mocy rozwijanej na kołach badanego samochodu,
- podciśnienia panującego w kolektorze dolotowym,
- temperatury powietrza dolotowego i spalin,
- strumienia masy paliwa gazowego dostarczanego do silnika.

Ciśnienie wewnątrz cylindra mierzono wykorzystując piezoelektryczny czujnik ciśnienia typu 6121 oraz wzmacniacz ładunku typu 5011 firmy KISTLER. Położenie wału korbowego oraz jego prędkość obrotową określano za pomocą znacznika położenia wału korbowego typu 2613B firmy KISTLER.

Dodatkowo, mierzono i rejestrowano sygnał z przetwornika ciśnienia absolutnego w kolektorze dolotowym silnika. Przetwornik ten jest integralną częścią układu zarządzania dawką paliwa benzynowego, wtryskiwanego do kolektora dolotowego silnika badanego samochodu.



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego [9]

Fig. 3. Scheme of testing stand [9]

Strumień masy paliwa gazowego dopływającego do układu zasilania silnika mierzono za pomocą precyzyjnej wagi tensometrycznej.

Wszystkie mierzone parametry rejestrowano i wizualizowano za pomocą karty akwizycji danych NI PCI-6143 i autorskiego programu, opracowanego w środowisku LabView 7.1.

4. METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono zgodnie z ustalonym programem, który obejmował:

- określenie mocy na kołach badanego samochodu, w zależności od jego prędkości przy zasilaniu silnika, przygotowanymi mieszankami DME i LPG,
- określenie przebiegu ciśnienia w zależności od kąta obrotu wału korbowego,
- określenie masowego zużycia paliwa.

Badania obejmujące indykowanie silnika i pomiar zużywanego paliwa zrealizowano na biegu jałowym oraz przy maksymalnym obciążeniu silnika dla prędkości obrotowych 1500, 2500 i 3500 1/min, dla każdej z przygotowanych mieszanki.

W trakcie badań nastawy regulacyjne silnika nie były korygowane, kąt wyprzedzenia zapłonu ustalany był przez sterownik zarządzający nim w czasie pracy na benzynie.

Stechiometryczny skład każdej z mieszanki ustalano i kontrolowano za pomocą sterownika zarządzającego dawką paliwa gazowego. Zawór EGR w czasie badań był zamknięty.

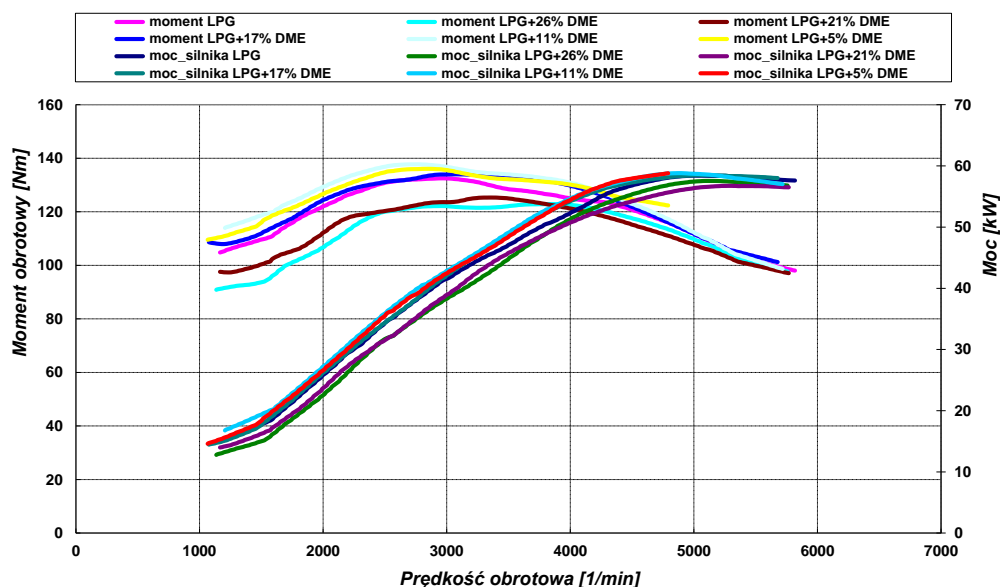
5. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Wyniki pomiarów mocy i momentu obrotowego rozwijanego przez silnik samochodu, zasilany mieszaninami o różnym udziale masowym DME zestawiono w tabeli 3, a przebieg zmian mocy i momentu obrotowego w zależności od prędkości obrotowej silnika przedstawiono na rys. 4.

Tabela 3

Moc i moment obrotowy silnika uzyskany na hamowni podwoziowej

L.p.	Paliwo udziały masowe	Moc [kW]	n_N [min^{-1}]	Moment obrotowy [Nm]	n_M [min^{-1}]
1	5% DME, 95% LPG	59,5	4772	140	2720
2	11% DME, 89% LPG	59,6	5001	141	2640
3	17% DME, 83% LPG	59,1	5001	135,2	2899
4	21% DME, 79% LPG	57,4	5210	128,2	3208
5	26% DME, 74% LPG	58,2	5350	125,4	2800
6	100% LPG	59,2	5071	134,8	2670

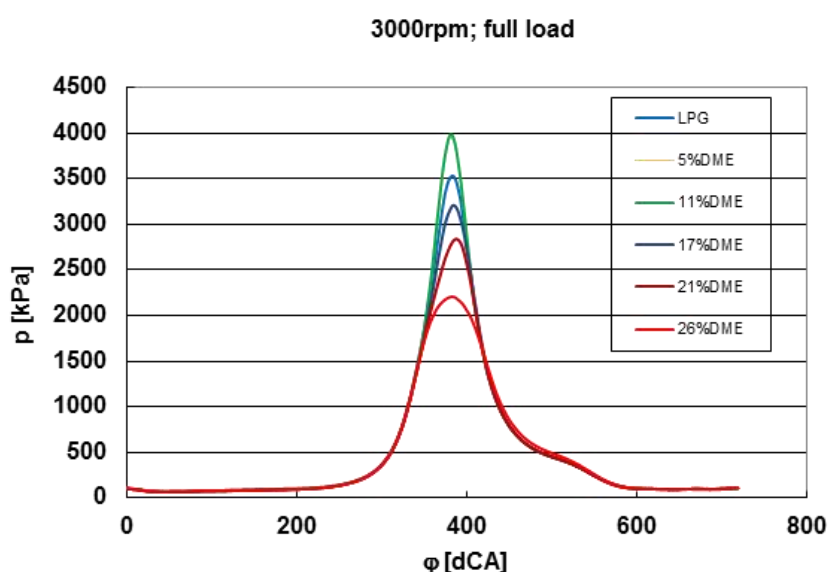


Rys. 4. Charakterystyki zewnętrzne badanego silnika w zależności od rodzaju zastosowanego paliwa
Fig. 4. Performance characteristics of engine powered by all prepared fuels

Uzyskane wyniki wskazują wyraźną zmianę mocy i momentu silnika w zależności od udziału masowego DME w mieszaninie gazów zasilających silnik. Maksymalne wartości mocy i momentu obrotowego ulegają obniżeniu w porównaniu z mieszaniną propanu i butanu, dla paliwa zawierającego powyżej 17% DME. Dla LPG wzbogaconego 5%, 11% i 17% udziałem DME zaobserwowano wzrost wartości momentu obrotowego i porównywalną wartość mocy rozwijanej przez silnik badanego samochodu.

Można więc wnioskować, że mieszanki o zawartości 5%, 11% i 17% DME zapewnią uzyskanie wyższych wartości momentu obrotowego, a w konsekwencji poprawę dynamiki samochodu.

Zwiększenie udziału masowego DME w mieszaninie powyżej 17% zmniejsza zarówno moment, jak i moc, rozwijaną przez silnik.

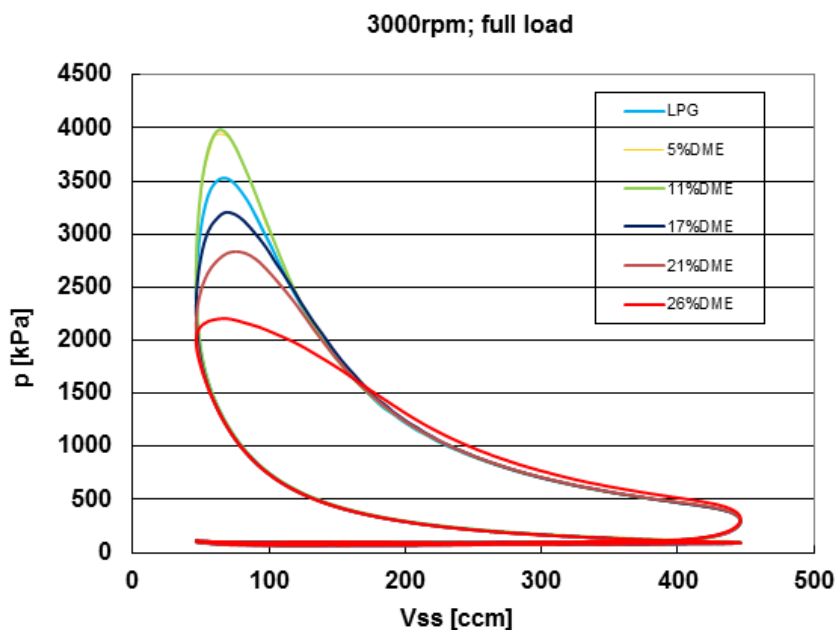


Rys. 5. Uśrednione przebiegi zmian ciśnienia dla badanych mieszanki, przy prędkości 3000 1/min i pełnym obciążeniu silnika

Fig. 5. Mean cylinder pressure as a function of crank angle for all tested fuels, rpm=3000, WOT

Uśrednione przebiegi ciśnienia dla 200 kolejnych cykli roboczych silnika, dla pełnego obciążenia silnika przy prędkości 3000 1/min przedstawiono na rys. 5, natomiast wykreślone na ich podstawie wykresy indykatorowe na rys. 6. Mieszanki DME i LPG zwiększyły nieznacznie wartości ciśnień maksymalnych i średnich pomimo tego, że prędkość obrotowa silnika, jego obciążenie i kąt wyprzedzenia zapłonu pozostawały niezmiennie. Mniejsza energia i temperatura zapłonu DME są również zasadniczymi powodami uzyskania maksymalnej wartości ciśnienia bliższej GMP. Natomiast udział masowy DME w mieszaninie ma decydujący wpływ na wartość kąta obrotu wału korbowego, przy którym ciśnienie osiąga wartość maksymalną.

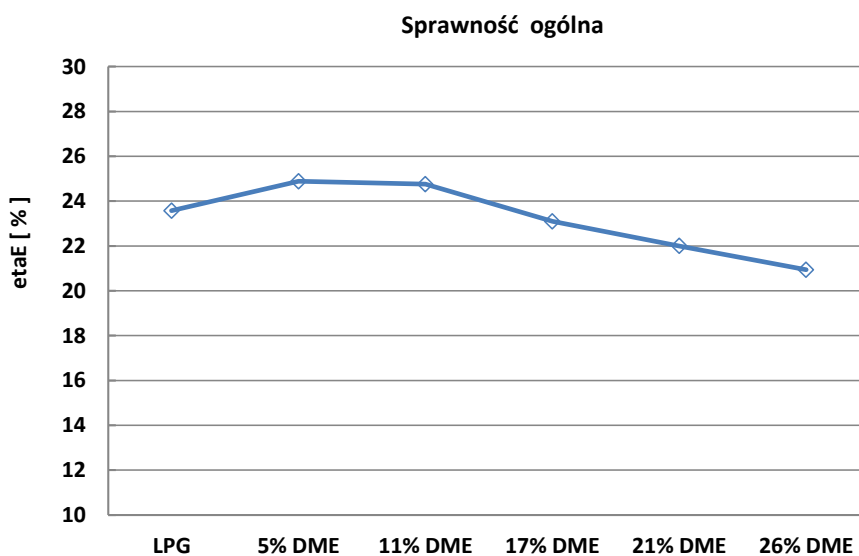
Stabilność spalania określono za pomocą kowariancji średniego ciśnienia stwierdzając, że nie przekracza ona 5% dla mieszanin zawierających do 17% DME i 7% dla mieszanin o udziale przekraczającym 17%.



Rys. 6. Wykresy indykatorowe zamknięte dla badanych mieszanin przy prędkości 3000 1/min i pełnym obciążeniu silnika

Fig. 6. P_V diagram for engine fueled by DME and LPG mixtures, rpm=3000 and WOT

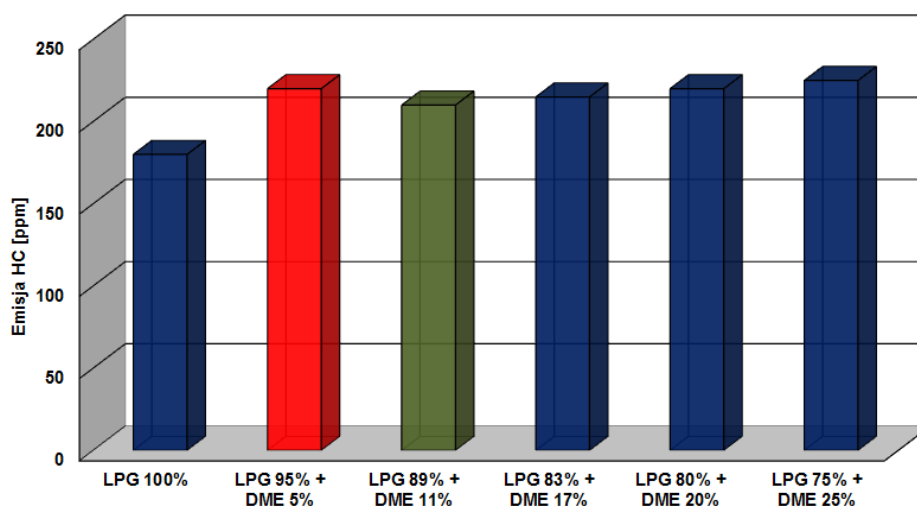
Na rys. 7 przedstawiono przebieg zmian sprawności ogólnej, którą wyznaczono na podstawie mocy dostarczonej wraz z paliwem i rozwijanej na kołach badanego pojazdu.



Rys. 7. Sprawność ogólna, uśredniona dla wszystkich punktów pomiarowych

Fig. 7. Engine efficiency, mean values for all measurements points

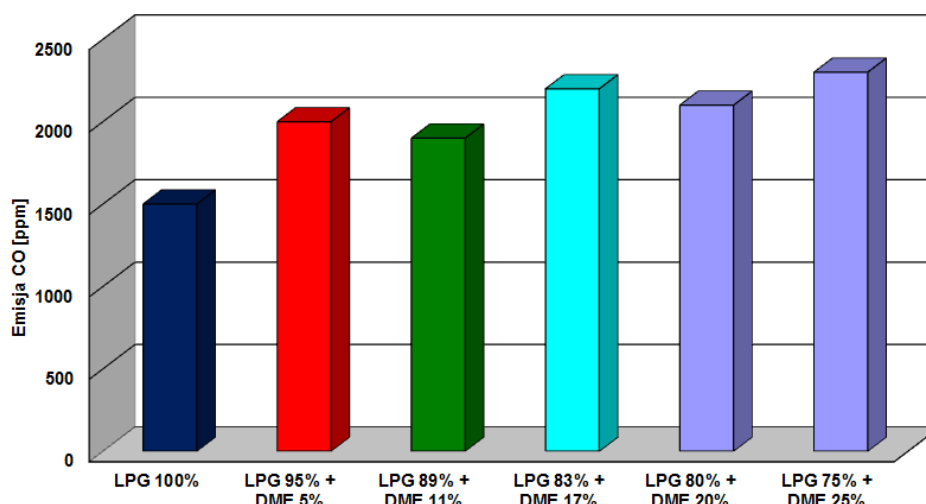
Wartości sprawności ogólnej uśredniono dla wszystkich punktów pomiarowych, które zrealizowano przy określonym udziale DME w mieszaninie, przy różnych prędkościach obrotowych i całkowitym otwarciu przepustnicy. Najwyższe wartości sprawności ogólnej uzyskano dla mieszanin zawierających od 5 do 11% DME. W tym zakresie udział DME w mieszaninie zapewniał uzyskanie sprawności wyższej niż uzyskiwana podczas zasilania silnika LPG. Wzrastający udział DME w mieszaninie powodował jednak obniżenie sprawności ogólnej w wyniku zmniejszenia energii dostarczanej do silnika wraz z paliwem.



Rys. 8. Emisja HC w zależności od udziału DME w mieszaninie, przy prędkości obrotowej silnika $n=2000$ obr/min

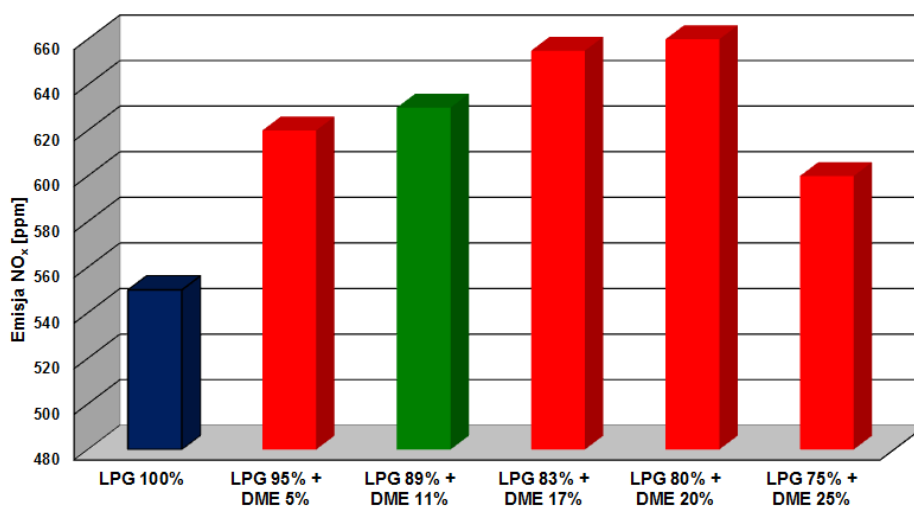
Fig. 8. Total hydrocarbon (THC) emission according to DME content at rpm=2000

Emisję HC w spalinach badanego silnika przedstawiono na rys. 8. Ponieważ paliwem zasilającym silnik jest mieszanina LPG i DME, ilość wyemitowanych węglowodorów zwiększa się nieznacznie wraz ze wzrostem udziału DME, w porównaniu z emisją dla LPG. Wzrost ten, z wyjątkiem 5% udziału DME, jest równomierny, a największa wartości emisji HC, uzyskana dla 25% udziału DME, nie przekracza 220 ppm. Charakter zmian poziomu emisji HC odpowiada zmianom emisji CO, którego zawartość w spalinach również zwiększa się wraz ze wzrostem udziału DME w mieszaninie dostarczanej do silnika. Emisję NO_x przy prędkości obrotowej 2000 1/min przedstawiono na rys. 10. Emisja ta wzrasta wraz ze wzrostem udziału DME, a zasadnicze przyczyny tego wzrostu to niższa energia i temperatura zapłonu mieszaniny. Te cechy wpływają na wcześniejsze rozpoczęcie procesu spalania i wyższe wartości maksymalnych ciśnień w cylindrze. Jednak przy 25% udziale DME w mieszaninie NO_x ulega nagłemu zmniejszeniu, co może być spowodowane spalaniem stukowym, które w wyniku określonych nastaw aparatury pomiarowej nie zostały zarejestrowane podczas badań.



Rys. 9. Emisja CO w zależności od udziału DME w mieszaninie, przy prędkości obrotowej silnika $n=2000$ obr/min

Fig. 9. Carbon monoxide emission according to DME content at engine rpm=2000



Rys. 10. Emisja NO w zależności od udziału DME w mieszaninie, przy prędkości obrotowej silnika $n=2000$ obr/min

Fig. 10. NO emission according to DME content at engine rpm=2000

6. WNIOSKI

Przeprowadzono badania stanowiskowe pojazdu napędzanego silnikiem ZI, zasilając go mieszaninami LPG i DME. Określono wpływ udziału masowego DME w mieszaninie na osiągi pojazdu, silnika oraz sprawność ogólną i przebieg procesu spalania.

Stwierdzono między innymi, że:

1. Zwiększenie udziału masowego DME powyżej 16% powoduje obniżenie rozwijanej przez silnik ZI mocy i momentu obrotowego, przy stałych, fabrycznych nastawach regulacyjnych.
2. Możliwa jest regulacja przebiegu procesu spalania poprzez zmiany udziału masowego DME w mieszaninie z LPG funkcji prędkości obrotowej.
3. Stabilność spalania, określona za pomocą kowariancji średniego ciśnienia nie przekracza 5% dla mieszanin zawierających do 17% DME i 7% dla mieszanin o udziale przekraczającym 17%.
4. Dla fabrycznych nastaw regulacyjnych silnika jest możliwe wykorzystanie mieszanin DME i LPG do napędu pojazdu jedynie w przypadku, gdy udział masowy nie przekracza 17%.

Wydają się celowe kontynuowanie badań w zakresie ustalenia zarówno optymalnych parametrów regulacyjnych silnika, jak i wyznaczenia odpowiedniej wartości współczynnika nadmiaru powietrza mieszaniny LPG DME.

Badania zrealizowano w ramach badań własnych finansowanych ze środków Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej.

Bibliografia

1. DME Handbook. Japan DME Forum. 2006 and 2012.
2. Van Mierlo J., Vereecken G., Maggetto G., Farrel V., Meyer S., Hecq W. Comparison of the Environmental Damage Caused by Vehicles with Different Alternative Fuels and Drivetrains in a Brussels Context. J. Automotive Eng. Proc. IMechE. Part D, vol. 217, no. D7, p. 583-594.
3. Sorenson S.C.: Dimethyl ether in diesel engines: Progress and perspectives. J. Eng. Gas Turbines Power, 2001, 123(3), p. 652-658.
4. Lee S., Oh S., Choi Y. Performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME blended LPG fuel. Fuel, 2009, Vol. 88(6), p.1009-1015.
5. Flekiewicz M., Dykier M. Studium nad wykorzystaniem mieszaniny DME i gazów ropopochodnych do zasilania silników ZI. Silniki Gazowe – Monografia nr 183. Politechnika Częstochowska, 2010, p. 216-230.
6. Lee S., Oh S., Choi Y., Kang K. Effect of n-Butane and propane on performance and emission characteristics of an SI engine operated with DME-blended LPG fuel. Fuel, Vol. 90 (2011), p. 1674-1680.

7. Campbell M., Wszyński Ł.P., Stone R.: Combustion of LPG in a Spark-Ignition Engine. SAE Paper 2004-01-0974.
8. Flekiewicz M.: Wykorzystanie DME do napędu pojazdów samochodowych. Czysta Energia, nr 114, 2011.
9. Fabiś P.: Pomiar ciśnienia indykowanego oraz drgań kadłuba silnika - koncepcja stanowiska badawczego. XXXII Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn, Węgierska Górka 2005.
10. Weidou N., Lijan T., Dewei F.: Rational cognition of DME market in China. Proceedings of 3rd Asian DME conference, 2006, p. 21-38.
11. Chin G.T., Chen J.Y., Rap Vi H., Dibble R.W.: Development and Validation of Reduced DME Mechanism Applicable to Various Combustion Modes in Internal Combustion Engines. Journal of Combustion. Volume 2011. Article ID 630580, p. 1-8.
12. Heywood J.B.: Internal combustion engines fundamentals. McGraw-Hill. New York 1998.
13. Rogers D.R.: Engine Combustion: Pressure Measurement and Analysis. SAE International 2010.