

Zdzisław STELMASIAK¹

MOŻLIWOŚCI DWUPALIWOWEGO ZASILANIA BENZYNĄ I ALKOHOLEM SILNIKÓW O ZAPŁONIE ISKROWYM

W artykule przedstawiono wyniki badań dwupaliwowego silnika o zapłonie iskrowym z wielopunktowym wtryskiem alkoholu i benzyny w okolice zaworu dolotowego. Zasilanie silnika realizowano przez prototypowy układ dolotowy posiadający podwójne wtryskiwacze sterowane elektronicznie. Zastosowany system umożliwia zasilanie silnika samą benzyną lub alkoholem oraz spalanie równoczesne mieszaniny obydwu paliw o dowolnym udziale alkoholu. Badania wykonano na 4-cylindrowym silniku o zapłonie iskrowym Fiat 1100 MPI. W artykule przedstawiono porównawcze wyniki badań parametrów silnika zasilanego dwupaliwowo o zmiennym udziale alkoholu metylowego. Badania pokazały korzystny wpływ dodatku alkoholu na sprawność silnika i toksyczność spalin, szczególnie dla większych udziałów alkoholu i obciążeń silnika.

THE POSSIBILITY OF DUAL FUELLING SI ENGINES WITH GASOLINE AND ALCOHOL

The paper presents test results of an engine run on gasoline and methyl alcohol. Initial tests were performed on Fiat 1100 MPI, four cylinder, spark ignited engine. Injection of the alcohol took place in area near inlet valve, via additional injectors assembled in suction manifold. Developed system enabled engine operation which, is run on gasoline or alcohol (methyl or ethyl one) and simultaneous combustion of a mixture of the both fuels with any mass fraction of the alcohol. Performed tests have shown advantageous effect of methyl alcohol on efficiency and concentration of nitrogen oxides and hydrocarbons in exhaust gases.

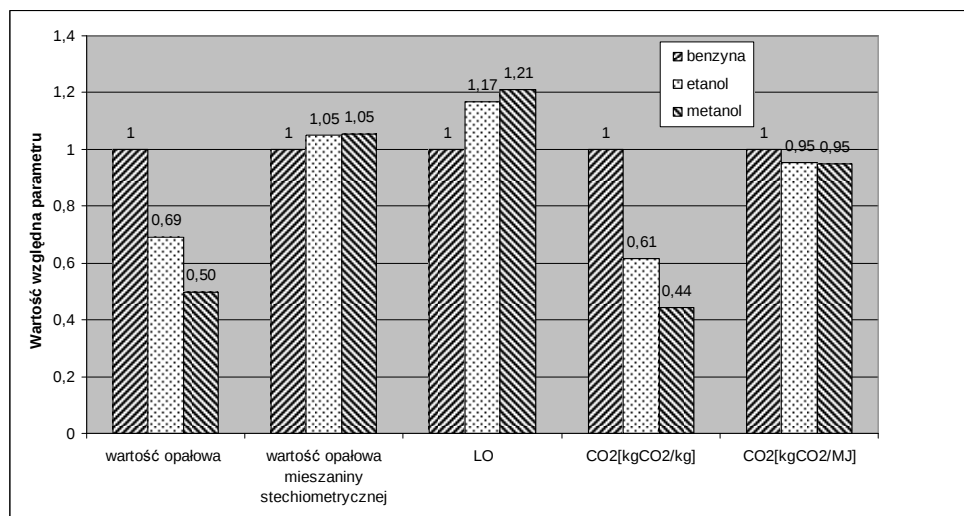
1. WSTĘP

Alkohole etylowy i metylowy są stosowane w silnikach tłokowych o zapłonie iskrowym od kilkadziesiąt lat. Początkowo wykorzystywano je jako domieszki do paliw węglowodorowych ze względu na wysoką odporność przeciwstukową i wysokie ciepło parowania [1-6]. Dzięki tym własnościom możliwe było podnoszenie stopnia sprężania i osiągnięcie silnika, co miało istotne znaczenie w wysiłonych silnikach, szczególnie sportowych. Ponowne zainteresowanie alkoholami obserwowane jest od lat

¹ Akademia Techniczno Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Silników Spalinowych i Pojazdów, 43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2, tel. +48 33 82-79-216

siedemdziesiątych ubiegłego wieku, co było spowodowane stopniowym ograniczaniem związków ołowiu w benzynach, kryzysem paliwowym oraz racjonalizacją zużycia zasobów ropy naftowej. Podstawowym problem dodatku alkoholi do benzyn jest zjawisko rozwarstwiania się mieszanin w niskich temperaturach w obecności wody. Z tego powodu stosowano mieszaniny trójskładnikowe benzyna-alkohol-benzol lub benzyna-alkohol-eter. Mimo dodatku stabilizatorów zawartość alkoholu w mieszaninach, w europejskich warunkach klimatycznych, nie przekraczała 8÷12%.

Znacznie korzystniejsze jest stosowanie alkoholu jako paliwa samoistnego, bowiem pozwala ono w pełni wykorzystać dużą odporność przeciwstukową alkoholu umożliwiającą zwiększenie stopnia sprężania i wzrost sprawności ogólnej oraz mocy jednostkowej silnika [2, 3, 7, 11]. Kierunek ten jest szczególnie rozwinięty w Brazylii gdzie eksploatuje się około 2 mln samochodów zasilanych alkoholem etylowym pozyskiwanym z manioku i trzciny cukrowej [12]. Porównanie względnych parametrów benzyny i alkoholi przedstawiono na rys. 1. Wynika z niego, że zastosowanie alkoholi, etylowego i metylowego powinno powodować ponad 5-cio procentowy wzrost osiągnięć silnika standardowego, co wynika z większej wartości opałowej mieszaniny stechiometrycznej. Dodatkowy wzrost parametrów może być osiągnięty przez szybszy proces spalania mieszanin alkoholowych oraz zmniejszenie strat pompowania ze względu na obniżenie temperatury zasysanego ładunku. Dalszy wzrost parametrów można również osiągnąć przez zwiększenie stopnia sprężania co jednak wymaga modyfikacji konstrukcyjnej silnika uniemożliwiającej pracę na samej benzynie.



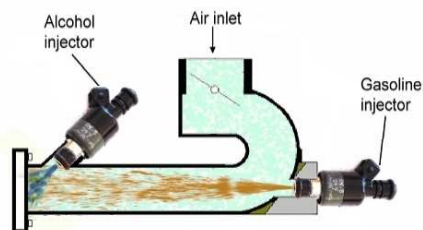
Rys.1. Porównanie względnych parametrów benzyny, etanolu i metanolu

Powszechne stosowanie wielopunktowego wtrysku paliw lekkich stwarza nowe możliwości w zakresie wielkości dodatku alkoholi do benzyn. W rozwiązaniu opisywanym w niniejszej pracy zastosowano dodatkowe wtryskiwacze na każdym cylindrze, przy czym oryginalne wtryskiwacze przeznaczone do wtrysku alkoholu natomiast dodatkowe do wtrysku benzyny. System ten umożliwia równoczesne zasilanie silnika benzyną i alkoholem, a udział alkoholu może zmieniać się w granicach 0÷100% zależnie od

obciążenia i prędkości obrotowej silnika [7-9]. Założeniem przeprowadzonych prac badawczych było zasilanie silnika przy małych obciążeniach samą benzyną lub mieszaniną z niewielkim dodatkiem alkoholu. Udział alkoholu zwiększał się w miarę wzrostu obciążenia silnika. Właściwy skład spalanej mieszaniny palnej sterowany był czasem otwarcia wtryskiwaczy benzynowego i alkoholowego. Kończącym etapem prac będzie zwiększenie stopnia sprężania do wartości ograniczonych spalaniem stukowym przy zasilaniu samym alkoholem. Pozwoli to na zwiększenie sprawności silnika przy częściowych obciążeniach, kiedy silnik będzie zasilany w głównej mierze benzyną. Należy zaznaczyć, że ten kierunek zasilania jest obecnie badany przez firmy Volvo i Ford, o czym świadczą doniesienia literaturowe [13].

2. OPIS PROTOTYPOWEGO SYSTEMU ZASILANIA SILNIKA

Istotą proponowanego systemu zasilania jest zastosowanie podwójnych wtryskiwaczy na każdym cylindrze, do wtrysku alkoholu i benzyny. Schemat prototypowego kolektora dolotowego przedstawiono na rys. 2. Dodatkowe wtryskiwacze umieszczono w przedniej części kolektora rys. 3. Wymagało to przeróbki kolektora umożliwiającej montaż wtryskiwaczy oraz wykonania nowej szyny paliwowej dla wtryskiwaczy dodatkowych. Do montażu wtryskiwaczy zastosowano tulejki stalowe wklejone do kolektora na kleju epoksydowym. Konieczność wykonania prototypowej szyny paliwowej wynikała z innego rozstawu wtryskiwaczy wynoszącego 37 mm. Alkohol wtryskiwany był przez oryginalny wtryskiwacz standardowego silnika, benzyna przez wtryskiwacz dodatkowy. Dokładniejsze opisy silnika i stanowiska badawczego przedstawiono w pracach [7, 8].



Rys. 2. Schemat prototypowego kolektora dolotowego silnika Fiat 1100



Rys. 3. Oryginalny kolektor dolotowy silnika Fiat 1100: 1 - miejsce usytuowania dodatkowych wtryskiwaczy

Badania przeprowadzono na 4-cylindrowym silniku o zapłonie iskrowym z wielopunktowym wtryskiem paliwa typ Fiat 1100 MPI. Dane techniczne silnika zamieszczono w tabeli 1 a widok stanowiska na rys. 4.

Tabela 1. Dane techniczne silnika Fiat 1100 MPI

Typ silnika	Fiat 1100 MPI
Średnica cylindra x skok	70 x 72 mm
Pojemność skokowa	1108 cm ³
Stopień sprężania	9,6
Moc znamionowa/prędkość obrotowa	40 kW/5000 obr/min
Moment obrotowy/prędkość obrotowa	88 Nm/3000 obr/min



Fig. 4. Widok stanowiska badawczego: 1 – prototypowa szyna paliwowa, 2 – wtryskiwacz dodatkowy, 3 – oryginalna szyna paliwowa

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

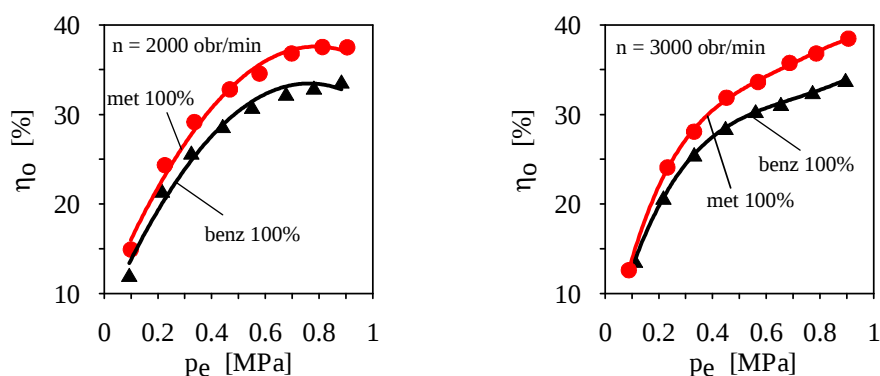
Problem dwupaliowości silnika może być rozważany z dwóch punktów widzenia: zasilanie tylko benzyną lub alkoholem, równoczesne zasilanie mieszaniną benzyny i alkoholu. W pierwszym przypadku stopień sprężania powinien pozostać taki jak w silniku fabrycznym. W drugim przypadku przy niewielkich obciążeniach silnik powinien być zasilany samą benzyną, a w miarę wzrostu obciążenia dodawany alkohol. Udział alkoholu może się zwiększać aż do 100% przy obciążeniach maksymalnych. W tym przypadku można zwiększyć stopień sprężania silnika o 1,5÷2,0 jednostki.

Z wymienionych wyżej powodów, badania porównawcze wykonano przy zasilaniu silnika tylko benzyną lub alkoholem i wtrysku paliw przez oryginalny wtryskiwacz oraz przy zasilaniu dwupaliowym o zmiennym udziale alkoholu metylowego. Udział alkoholu metylowego liczony energetycznie wynosił 20, 40, 60, 80 i 100%. Kąt wyprzedzenia wtrysku był identyczny jak przy zasilaniu benzyną. Przy zasilaniu dwupaliowym benzyna była wtryskiwana przez wtryskiwacz dodatkowy a alkohol przez wtryskiwacz fabryczny. Należy zaznaczyć, że przy małych udziałach alkoholu, duża ilość benzyny wtryskiwana jest przez dodatkowy wtryskiwacz oddalony od zaworu dolotowego co pogarsza warunki tworzenia mieszaniny benzyna-powietrze i może mieć wpływ na parametry silnika. Porównanie wartości parametrów silnika dwupaliowego odnoszono do wartości uzyskanych przy zasilaniu samą benzyną, wtryskiwaną przez oryginalny wtryskiwacz standardowego silnika.

Warto podkreślić, że przy zasilaniu samym metanolem silnik rozwijał większy moment obrotowy o około 5% w stosunku do zasilania benzyną. Wynik ten uzyskano bez

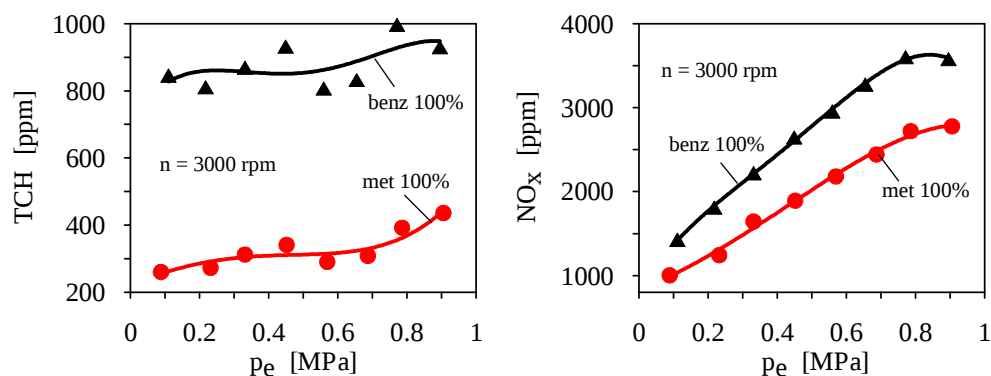
optymalizacji kąta wyprzedzenia zapłonu, a więc można zakładać, że osiągi silnika przy tym zasilaniu i optymalizacji regulacji mogą być jeszcze wyższe. W analizie przedstawionej w niniejszej pracy ograniczono się jedynie do punktów pracy dla tych samych obciążeń silnika. Przy tym założeniu punkty pracy silnika o większym momencie obrotowym w stosunku do zasilania benzyną zostały pominięte.

Porównanie sprawności ogólnej silnika przedstawione na rys. 5 wskazuje, że silnik zasilany metanolem pracuje z większą sprawnością w całym zakresie zmian obciążenia i prędkości obrotowej. Równocześnie różnice w sprawnościach powiększają się wraz ze wzrostem obciążenia i w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń różnice bezwzględne wynoszą 3÷5%, co daje wzrost względny sprawności, decydujący o eksploatacyjnych zużyciach energii, w zakresie 10÷16%.



Rys.5. Porównanie sprawności silnika Fiat 1100MPI przy zasilaniu benzyną i metanolem

Zastosowanie metanolu korzystnie wpływa na stężenia węglowodorów i tlenków azotu w spalinach rys. 6. W całym zakresie zmian obciążenia obserwowano prawie 2÷3-krotne zmniejszenie stężenia węglowodorów w stosunku do zasilania benzyną. Tak istotne zmiany mogą być tłumaczone odmiennym składem chemicznym metanolu CH_3OH w stosunku do mieszaniny różnych węglowodorów o złożonych składach chemicznych wchodzących w skład benzyny. Czas utleniania węglowodoru wzrasta w miarę zwiększania ilości atomów węgla i wodoru, co w szybkoobrotowych silnikach ZI wpływa na stężenia węglowodorów w spalinach. Nie bez znaczenia jest również fakt, że w cząsteczce metanolu zawarty jest tlen, który uwalniany w procesie spalania przyspiesza utlenianie atomów węgla i wodoru. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym szybkiemu utlenianiu metanolu są wyższe temperatury w czasie spalania w stosunku do występujących przy zasilaniu benzyną.

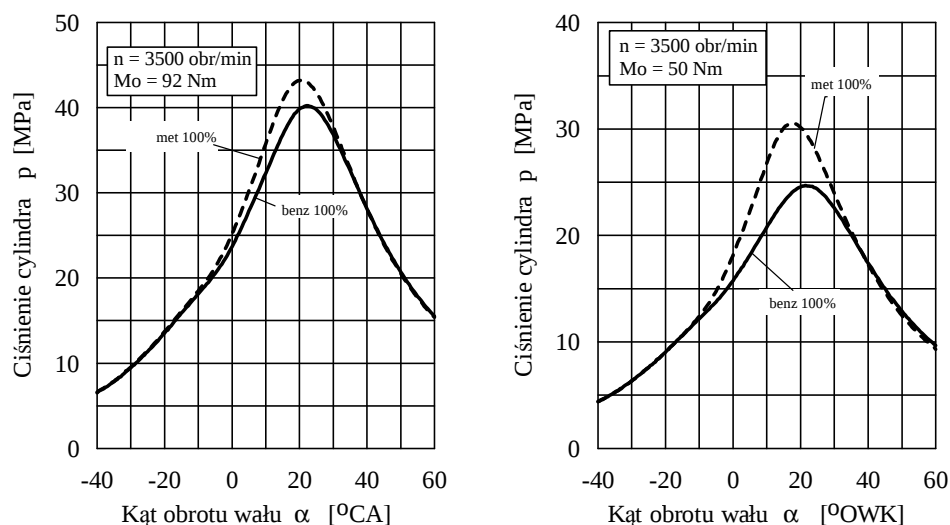


Rys. 6. Porównanie stężenia węglowodorów TCH i tlenków azotu NOx w spalinach silnika Fiat 1100MPI zasilanego benzyną i metanolem

Z ekologicznego punktu widzenia szczególnie istotne jest zmniejszenie stężenia NOx w spalinach występujące w całym zakresie zmian obciążenia rys. 6. Różnice w stężeniach NOx powiększają się w miarę wzrostu obciążenia silnika i w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń wynoszą 40÷60%. Fakt zmniejszenia emisji NOx przy zasilaniu metanolem sygnalizowany był również we wcześniejszych doniesieniach literaturowych [1, 2, 3], natomiast analiza uzyskanych wyników badań wskazuje na znaczne rozmiary tego zjawiska. Z uwagi na duże trudności w redukcji tlenków azotu w katalizatorach, opisywana korzystna cecha spalania metanolu wymaga szczególnego podkreślenia.

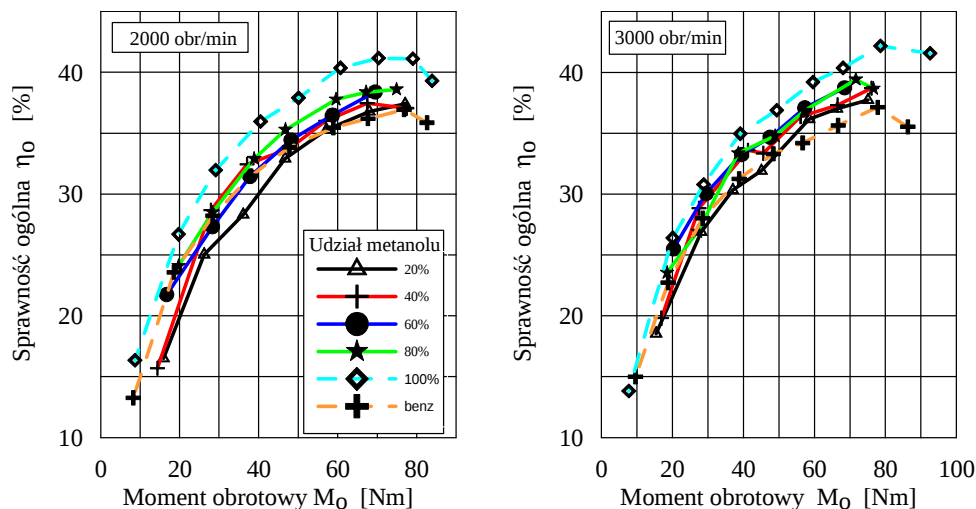
Wydaje się, że wyjaśnienie przyczyn obniżenia ilości NOx tworzonych w procesie spalania metanolu nie jest łatwe i wymaga dodatkowych szczegółowych analiz. Wprawdzie czas spalania mieszaniny metanol-powietrze jest krótszy, ale równocześnie średnie temperatury czynnika podczas spalania są większe. Wpływ czasu na ilości tworzonego NO, głównego składnika tlenków azotu w spalinach silnika ZI, jest liniowy, natomiast wpływ temperatury ma charakter wykładniczy. Wzrost temperatury powinien zatem istotniej wpływać na ilości tworzonego NO niż zmniejszenie czasu i w konsekwencji prowadzić do wzrostu stężenia NOx w spalinach. Wydaje się jednak, że w tym przypadku istotną rolę może odgrywać znacząca ilość tlenu zawarta w cząsteczkach metanolu, która głównie bierze udział w utlenianiu paliwa. Przy tych samych współczynnikach nadmiaru powietrza dla metanolu i benzyny, ilość tlenu dostarczana wraz z zasysanym powietrzem jest mniejsza przy zasilaniu metanolem i to może wpływać na zmniejszenie ilości tworzonego NOx.

Zmiany przebiegu spalania przy zasilaniu silnika alkoholem wpływają na zmiany przebiegu ciśnienia w cylindrze co pokazano na rys. 7. Mieszanina alkohol-powietrze spala się szybciej niż benzyna, a maksymalne ciśnienia cylindra są osiągane wcześniej. Szczególnie widoczne jest to przy częściowych obciążeniach silnika. Zjawisko to jest jednym z powodów wzrostu sprawności ogólnej silnika.



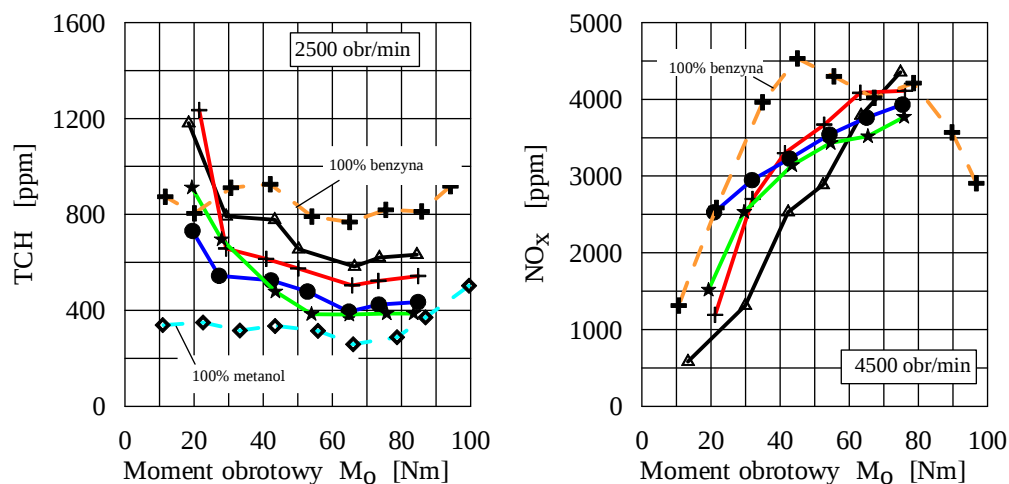
Rys. 7. Porównanie przebiegu ciśnienia w cylindrze w czasie spalania w silniku Fiat 1100 MPI zasilanym benzyną i alkoholem

Porównanie sprawności ogólnej silnika w funkcji obciążenia silnika dla różnych udziałów metanolu przedstawiono na rys. 8. Dodatek metanolu powoduje zwiększenie sprawności ogólnej silnika w miarę powiększania udziału metanolu i obciążenia silnika. Dla większych udziałów metanolu sprawności były większe od występujących przy zasilaniu benzyną. Szczególnie duże różnice występują przy zasilaniu samym metanolem (udział 100%). Dla niewielkiego dodatku metanolu (udział 20%) przy małych obciążeniach sprawność przy zasilaniu dwupaliwowym była mniejsza niż przy zasilaniu tradycyjnym. Nie podważa to jednak korzystnego wpływu dodatku metanolu na sprawność, bowiem wpływ na wyniki miał prawdopodobnie fakt, że przy zasilaniu dwupaliwowym benzyna była wtryskiwana przez dodatkowy wtryskiwacz oddalony od zaworu dolotowego. Miało to wpływ na warunki tworzenia mieszaniny benzyna-powietrze i przy przewadze udziału benzyny oraz małych obciążeniach silnika decydowało o uzyskiwanej sprawności. W omawianych warunkach pracy silnika, korzystny wpływ metanolu, proporcjonalny do jego udziału w ładunku, nie kompensował straty sprawności powodowanej pogorszeniem warunków odparowania i mieszania benzyny z powietrzem. Należy zaznaczyć, że już wcześniejsze badania wstępne wykonane po zamontowaniu prototypowego kolektora wykazały niekorzystny wpływ zmiany położenia punktu wtrysku benzyny na sprawność silnika. Wydaje się, że korzystniejsze wyniki można byłoby uzyskać przy zastosowaniu mieszalnika wstępnego alkoholu i benzyny i wtrysku przygotowanej wcześniej mieszaniny przez oryginalny wtryskiwacz. Zagadnieniom tym będą poświęcone planowane w przyszłości badania.



Rys. 8. Porównanie sprawności ogólnej silnika Fiat 1100 MPI zasilanego samą benzyną i dwupaliwowo przy różnych udziałach metanolu

Dodatek metanolu wpływa również korzystnie na ekologiczne własności silnika powodując zmniejszenie stężenia węglowodorów i tlenków azotu w spalinach co pokazano na rys. 9. Stężenie węglowodorów w zakresie średnich i maksymalnych obciążeń silnika maleje wraz ze wzrostem udziału metanolu w mieszaninie. W zakresie małych obciążeń silnika i dodatku metanolu mniejszym od 40% stężenia węglowodorów mogą być jednak większe co prawdopodobnie związane jest z pogorszeniem warunków tworzenia homogenicznej mieszaniny benzyna-powietrze sygnalizowanym wcześniej.



Rys. 9. Porównanie stężenia węglowodorów TCH i tlenków azotu NO_x silnika Fiat 1100 MPI zasilanego benzyną i dwupaliwowo przy różnych udziałach metanolu

Porównanie sprawności ogólnej silnika przedstawione na rys. 5 i 8 wskazuje, że silnik zasilany dwupaliwowo pracuje z większą sprawnością prawie w całym zakresie zmian obciążenia i prędkości obrotowej. Równocześnie dodatek metanolu korzystnie wpływa na własności ekologiczne silnika (zmniejszenie stężenia TCH i NO_x w spalinach) oraz zmniejszenie temperatury spalin.

Wydaje się, że zarówno wzrost maksymalnych parametrów eksploatacyjnych jak i sprawności silnika może być spowodowany przez większą szybkość spalania metanolu, co powoduje mniejsze straty ciepłe w cyklu. Dodatkowo większe ciepło parowania metanolu wpływa na obniżenie temperatury ładunku w czasie sprężania i na początku procesu spalania, co może prowadzić do zmniejszenia strat mechanicznych w suwie sprężania i powiększenia sprawności. Dalszy wzrost parametrów silnika może być osiągnięty przez zwiększenie stopnia sprężania i optymalizację regulacji silnika. Zaproponowany system dwupaliwowego zasilania z aktywną zmianą udziału alkoholu zależnie od obciążenia silnika i prędkości obrotowej umożliwia wprowadzenie sygnalizowanych zmian.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- Zaproponowany układ dwupaliwowego zasilania silnika o zapłonie iskrowym umożliwia równoczesne zasilanie silnika benzyną i alkoholem o dowolnym udziale alkoholu.
- Dwupaliwowe zasilanie silnika benzyną i alkoholem metylowym korzystnie wpływa na parametry zewnętrzne silnika takie jak sprawność ogólna, moc maksymalna i maksymalny moment obrotowy.
- Wzrost sprawności ogólnej silnika zwiększa się wraz ze zwiększaniem udziału metanolu i obciążenia silnika. Bezwzględny wzrost sprawności wynosił 2÷5% a względny w zakresie 6÷16%. Znaczący wzrost sprawności silnika powinien prowadzić do zmniejszenia zużycia energii w eksploatacji i poprawy ekologicznych parametrów silnika.
- Wydaje się, że ze względu na podobieństwo chemiczne alkoholu metylowego i etylowego podobne wyniki do opisanych można uzyskać przy dodatku alkoholu etylowego do benzyny.
- Prawidłowe wykorzystanie dużej odporności przeciwstukowej alkoholu etylowego i metylowego wymaga podniesienia stopnia sprężania o 1,5÷2,0 jednostek, co powinno przyczynić się do wzrostu sprawności ogólnej silnika, szczególnie przy częściowych obciążeniach,
- Wprowadzenie dodatkowego paliwa alkoholowego powinno prowadzić do zmniejszenia emisji podstawowych składników spalin szczególnie THC i NO_x oraz dwutlenku węgla CO₂

Badania opisywane w niniejszej pracy zostały wykonane w ramach grantu badawczego nr PB 45343/B/T02/2007/33 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Merkisz J., Pielucha I.: *Alternatywne napędy pojazdów*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
- [2] Baczewski K., Kołdoński T.: *Paliwa do silników o zapłonie iskrowym*. WKiŁ, W-wa 2005.
- [3] Kowalewicz A.: *Metanol jako paliwo do silników spalinowych*. Silniki Spalinowe nr 3-4, 1992.
- [4] Kotowski W., Klimiec J., Marcjasz - Siemiątkowska I.: *Możliwości wykorzystania metanolu i jego pochodnych jako paliw silnikowych*. Przemysł Chemiczny nr 80/1/2001.
- [5] Lotko W.: *Studium zastosowań paliw alternatywnych w silnikach o zapłonie samoczynnym*. Wyd. Politechniki Radomskiej, 1999.
- [6] Jakubowski J.: *Silniki samochodowe zasilane paliwami zastępczymi*. WKiŁ, 1987.
- [7] Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: *Preliminary tests on dual fuel spark ignition engine fuelled with methanol and gasoline*. Combustion Engines No 3/2008 (134), pp. 24-33, 2008.
- [8] Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: *Analysis of a chosen combustion parameters of dual fuel SI engine fuelled with alcohol and gasoline*. Combustion Engines No 2/2009 (137), pp. 29-36, 2009.
- [9] Stelmasiak Z., Larisch J., Semikow J.: *Some aspects of bifuel SI engine run on alcohol and gasoline*, 12th EAEC European Automotive Congress Bratislava 2009.
- [10] Brinkman, N., Halsall, R., Jorgensen, S.W., Kirwan J.E.: *The Development Of Improved Fuel Specifications for Methanol (M85) and Ethanol (E85)*. SAE Technical Paper 940764.
- [11] Kelly, K.J., Bailey, B.K., Coburn, T.C., Clark, W., Lissiuk, P.: *Federal Test Procedure Emissions Test Results from Ethanol Variable-Fuel Vehicle Chevrolet Lumina*. SAE Technical Paper 961092.
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Alcohol_fuel#Alcohol_in_Brazil, 2008.
- [13] <http://www.greencarcongress.com/2008/08/alcohol-boostin.html>, 2008.