ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: TRANSPORT z. 61 Nr kol. 1704

Marek FLEKIEWICZ

STUDIUM EKSPERYMENTALNE NAD WYKORZYSTANIEM MIESZANINY WODORU I METANU DO NAPĘDU SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. Normy ograniczające poziomy emisji składników toksycznych spalin stanowią zasadniczą przyczynę doskonalenia konstrukcji silników spalinowych i poszukiwania nowych paliw. Wśród alternatywnych paliw gazowych wodór i gaz ziemny traktowane są dzisiaj jako paliwa czyste, a ich wykorzystanie do napędu silników spalinowych pozwala na znaczne obniżenie emisji składników toksycznych. Ponadto, oba paliwa w procesie ich spalania w silniku spalinowym emitują znacznie mniej dwutlenku węgla, czyli gazu powodującego globalne ocieplenie. W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań wstępnych czterocylindrowego silnika ZI o objętości skokowej 1,6 dm^3, zasilanego gazem ziemnym i mieszaniną metanu z wodorem. W badaniach wykorzystano gaz ziemny oraz metan wzbogacony wodorem w ilości 5, 10 i 15%, a w ostatniej fazie badań, obejmującej jedynie określenie zmiany kąta wyprzedzenia zapłonu, także wodorem w ilości 20 i 30%.

EXPERIMENTAL STUDY FOR CNG AND HYDROGEN MIXING USING TO IC ENGINES

Summary. It is well known that adding hydrogen to natural gas extends the limit of combustion and that in this way extremely low emission levels can be obtained. The emission reduction is specially important at light engine load. In this paper results are presented for a four cylinder 1,6 liter engine. Natural gas and different blends of natural gas and hydrogen have been tested. The fuel supply system used provides natural gas-hydrogen mixtures in variable proportion, regulated independently of engine operating condition. The influence of fuel composition on engine operating characteristics and exhaust emission has been examined.

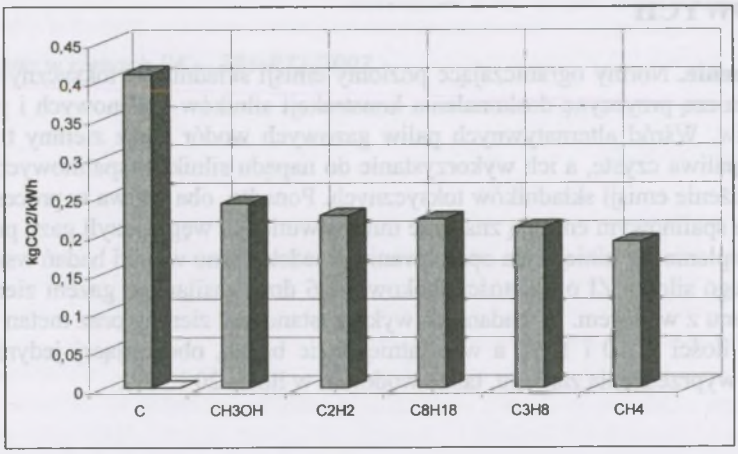
1. WPROWADZENIE

Wodór i gaz ziemny są paliwami silnikowymi, które zapewniają uzyskanie podobnej energii. Cechują się one podobnym zużyciem jednostkowym paliwa i zbliżonym poziomem emisji składników toksycznych. W zależności od rodzaju wykorzystywanego paliwa parametry regulacyjne silnika, takie jak czas wtrysku i kąt rozpoczęcia wtrysku paliwa, powinny być jednak optymalizowane dla każdego z tych paliw.

Przydatność wodoru, jako pełnowartościowego paliwa do napędu silników ZI, wykazano na przełomie lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych poprzedniego stulecia [1]. Czystość spalania oraz odnawialność tego paliwa stanowią zasadnicze argumenty jego wykorzystania do napędu środków transportowych. Ponadto, wykorzystanie przemiany elektrochemicznej wodoru w ogniwach paliwowych uważa się za najbardziej czystą i niezwykle wydajną, przyszłościową technologię pozyskania energii dla napędu pojazdów samochodowych. Dzisiaj nie ma większych przeszkód technicznych w wykorzystaniu wodoru w silnikach ZI, niewielkie

koszty przystosowania silnika zapewniają uzyskanie widocznych efektów ekologicznych, obniżając poziom emisji zarówno składników toksycznych, jak i CO_2 [2].

Bardzo szeroki zakres zapalności mieszanki powietrzno-wodorowej połączony ze znaczną szybkością spalania, umożliwia zasilanie silnika mieszankami ubogimi. W rezultacie należy spodziewać się znacznego obniżenia stężenia NO_x w spalinach, a w konsekwencji eliminacji katalizatorów, które wraz z upływem czasu ulegają uszkodzeniom.



Rys. 1. Porównanie poziomu emisji dwutlenku węgla dla wybranych paliw silnikowych (Węgiel – C, Metanol – CH_3OH, Acetylen – C_2H_2, Izooktan – C_8H_{18}, Propan – C_3H_8, Metan – CH_4)
Fig. 1. Comparison of CO_2 emission from selected alternative fuels

Tabela 1

Wybrane właściwości wodoru, metanu i benzyny

Właściwości	WODOR	METAN	BENZYNA
Granica zapalności [% objętości gazu w powietrzu]	4-75	5,3-15,0	1,2-6,0
Minimalna energia zapłonu [mJ]	0,02	0,28	0,25
Laminarna szybkość spalania [m/s]	1,90	0,38	0,37-0,43
Adiabatyczna temperatura płomienia [K]	2318	2190	~2470
Temperatura samozapłonu [K]	858	813	~500-750
Gęstość [kg/m³] w temperaturze 300K, przy ciśnieniu 101,3 kPa	0,082	0,717	
Teoretyczne zapotrzebowanie powietrza [kg/kg]	~34	~17,2	14,8
Wartość opałowa mieszanki stechiometrycznej [MJ/kg]	~3,37	~2,56	~2,79
Wartość opałowa [MJ/kg]	120	50	44,5

Szybkość spalania gazu ziemnego jest mniejsza, ale granica zapalności jego mieszanki z powietrzem zawiera się pomiędzy tą charakteryzującą wodór i benzynę. W konsekwencji należy spodziewać się, że dodatek wodoru do metanu zwiększy szybkość spalania mieszaniny, zmniejszając udział niespalonych węglowodorów w spalinach.

Zmniejszenie ilości węgla w ładunku wypełniającym komorę spalania silnika powinno zmniejszyć udział tlenku węgla (CO) i dwutlenku węgla (CO_2) w produktach spalania silnika.

Niewielki udział wodoru w gazie ziemnym, jak wykazały wyniki badań wstępnych przeprowadzonych w Katedrze Budowy Pojazdów Politechniki Śląskiej, nie powinien:

- wpłynąć na wzrost ceny tego paliwa,
- zwiększyć kosztów magazynowania i transportu gazu ziemnego,
- pogorszyć bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń infrastruktury i pojazdu [3].

Biorąc pod uwagę, że w wielu krajach świata sprężony gaz ziemny jest obecnie szeroko wykorzystywany jako paliwo silnikowe, przygotowanie na bazie gazu ziemnego mieszaniny metanowo-wodorowej nie stanowi technicznego problemu. Pozwala to na otrzymanie mieszanin łączących w sobie właściwości obu paliw. W niniejszym opracowaniu przedstawiono korzyści jakie daje dodatek wodoru do silnika zasilanego sprężonym gazem ziemnym, zwiększając jego zakres pracy dla mieszanek ubogich i obniżając poziom emisji NOx .

2. OBIEKT BADAŃ I STANOWISKO POMIAROWE

Obiektem badań był samochód OPEL Astra napędzany czterocylindrowym, ośmio- zaworowym silnikiem ZI, o objętości skokowej 1600 cm^3 i mocy 55kW. W układzie zasilania silnika zastosowano jednopunktowy wtrysk paliwa benzynowego typu MULTEC, natomiast w sterowanym mikroprocesorowo bezpośrednim układzie zapłonowym zapewniono możliwość korekty jego charakterystyk. Ponadto, silnik przystosowano do zasilania paliwami gazowymi LPG i CNG. Zasadnicze elementy i urządzenia instalacji zasilającej paliwami gazowymi firmy Tartarini Auto przedstawiono na rysunku 2.

Rys. 2. Widok komory silnika badanego samochodu
Fig. 2. Engine compartment of tested vehicle

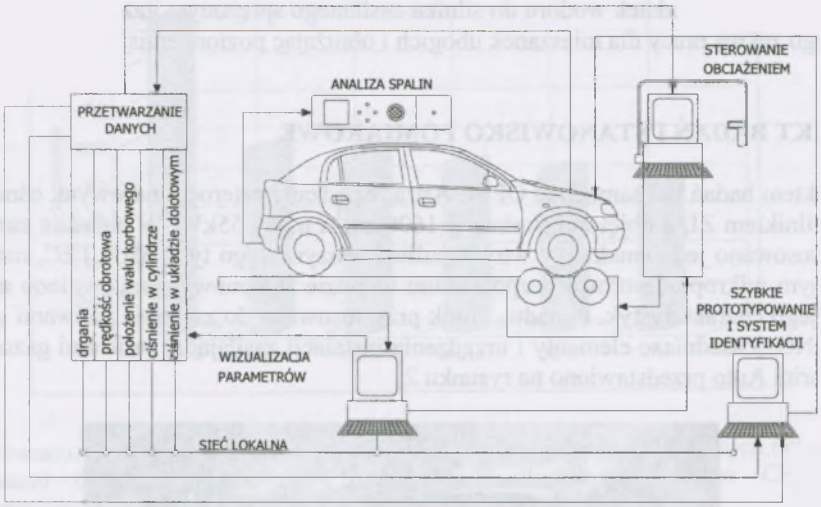
Pojazd badano na hamowni podwoziowej typu FLA 203 firmy BOSCH, która między innymi umożliwia pomiary takich parametrów, jak: moc i moment obrotowy silnika, siła napędowa, moc na kołach oraz przyspieszenie pojazdu.

Stanowisko badawcze wyposażono również w przetworniki i czujniki pozwalające na określenie chwilowego stanu pracy silnika. W skład układów kontrolno-pomiarowych, umożliwiających ciągłą rejestrację stanu pracy silnika, wchodzą urządzenia pozwalające na pomiar:

- kąta obrotu wału korbowego wraz ze znaczeniem GMP tłoka,
- ciśnień panujących wewnątrz komory spalania,

- przyspieszeń drgań ścianki bloku silnika,
- mocy i momentu obrotowego silnika,
- podciśnienia panującego w kolektorze dolotowym.

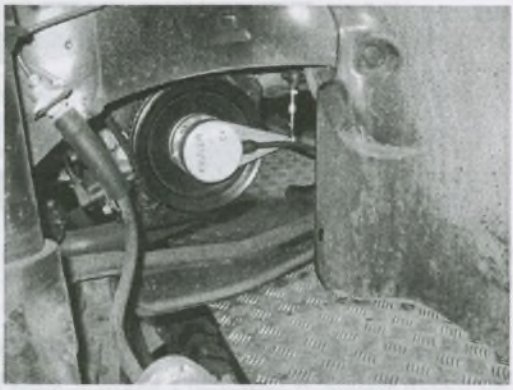
Zużycie paliw mierzono za pomocą precyzyjnej wagi tensometrycznej, przy czym dla paliw gazowych przygotowano specjalny zasobnik z trzema butlami kompozytowymi (rys. 4). Sygnały wszystkich czujników i przetworników rejestrowano za pomocą karty akwizycji danych NI-DAQ PCI 6143, a ich analizę przeprowadzano przy wykorzystaniu oprogramowań Diadem, LabView i dSpace.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego
Fig. 3. Measurement setup

A

B



Rys. 4. Zasobnik magazynujący paliwa gazowe (A) i znacznik położenia wału korbowego (B)
Fig. 4. Special container for gaseous fuel (A) and engine crank angle encoder (B)

3. PRZEBIEG I WYNIKI BADAŃ

Badany pojazd, zasilany paliwem benzynowym oraz paliwami gazowymi, tj. CNG i mieszaninami CNG/H_2, poruszał się po rolkach hamowni podwoziowej. Zmianę prędkości obrotowej realizowano za pomocą hamulca elektrowirowego, a obciążenie silnika przy określonym otwarciu przepustnicy ustalono na stałym poziomie. W trakcie pomiarów rejestrowano sygnały dla różnych prędkości obrotowych silnika, w tym także dla prędkości obrotowej odpowiadającej napędzaniu silnika przez rozrusznik. Pomiary zrealizowano w dwóch etapach: przy zasilaniu paliwem benzynowym i paliwem gazowym (CNG) oraz dla mieszanin metanu i wodoru.

Program badań zrealizowany dla silnika zasilanego benzyną oraz sprężonym gazem ziemny przedstawiono w tabeli 2. Natomiast w przypadku silnika zasilanego mieszaniną metanu i wodoru badania obejmowały:

- pomiary ciśnienia wewnątrz cylindra dla kilku wybranych wartości współczynnika nadmiaru powietrza,
- pomiary mocy i momentu obrotowego silnika zasilanego,
- pomiary emisji podstawowych składników spalin, tj. CO, HC, NO_x i CO_2.

W badaniach wykorzystano mieszaniny metanu i wodoru zawierające 5, 10 i 15% wodoru.

Tabela 2

Szczegółowy przebieg badań dla silnika zasilanego benzyną i CNG

Pomiar	Prędkość obrotowa [min^{-1}]	Rodzaj paliwa zasilającego	Obciążenie [%]	UWAGI
1	800	Benzyna	-	
2	4000		-	
3	1500		100	
4	2000		100	
5	2500		100	
6	3000		100	
7	3500		100	
8	4000		100	
9	800	CNG	-	
10, 11, 12, 13, 14	1500		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15
15, 16, 17, 18, 19	2000		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15
20, 21, 22, 23, 24	2500		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15
25, 26, 27, 28, 29	3000		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15
30, 31, 32, 33, 34	3500		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15
35, 36, 37, 38, 39	4000		100 i 50	Dla kąta wyprzedzenia zapłonu +0, +6, +9, +12, +15

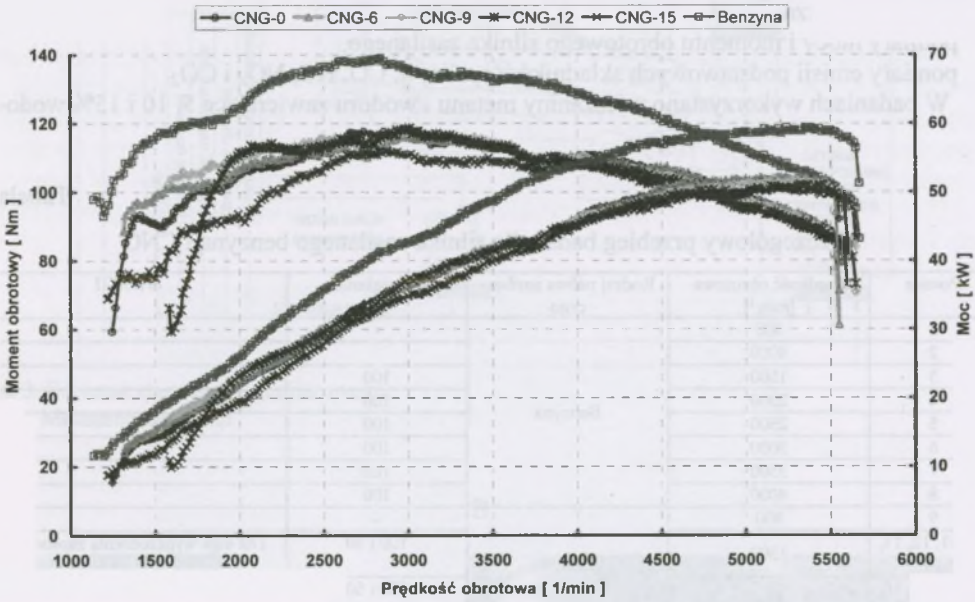
4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań mocy i momentu obrotowego silnika zasilanego benzyną oraz gazem ziemnym. Krzywe mocy i momentu obrotowego dla silnika zasilanego benzyną uzyskano realizując strategie regulacji kąta wyprzedzenia zapłonu i dawki paliwa opracowane przez producenta samochodu. W przypadku gazu ziemnego charakterystykę kąta wyprzedzenia zapłonu korygowano liniowo w zakresie od +6 do +15° OWK. Natomiast dawkę paliwa gazowego, tj. sprężonego gazu ziemnego, ustalano na podstawie opracowanego na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej algorytmu sterowania. Brak korekcji kąta w przy-

padku zmiany paliwa zasilającego silnik z benzyny na gaz ziemny powoduje spadek mocy maksymalnej o 10% i obniżenie wartości maksymalnej momentu obrotowego o 15%.

Minimalne wartości strat mocy uzyskujemy wprowadzając co najmniej liniową korekcję kąta wyprzedzenia zapłonu w zakresie od +9 do +12° OWK, w stosunku do ustawień przyjętych przez producenta. Jednak dla właściwego wykorzystania energii zawartej w paliwie gazowym wskazane jest opracowanie całkowicie odmiennej strategii dla kąta wyprzedzenia zapłonu. Strategia ta umożliwiłaby zmianę charakterystyki momentu, przesuwając jego wartość maksymalną w kierunku niższej prędkości obrotowej silnika, zwiększając równocześnie zakres prędkości obrotowej, w którym wartość momentu jest bliska maksymalnej.

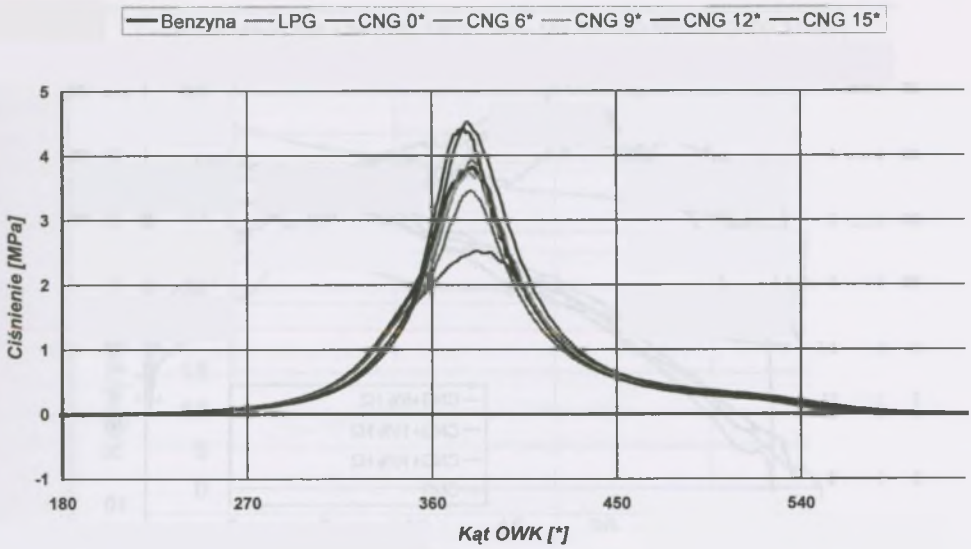
Wpływ wprowadzanej w trakcie badań korekty kata wyprzedzenia zapłonu na przebieg procesu spalania przedstawiono na rysunku 6. Zwiększenie kąta wyprzedzenia zapłonu silnika zasilanego gazem ziemnym zapewnia uzyskanie wyższych wartości ciśnienia maksymalnego przy równoczesnym zbliżeniu maksimum do GMP.



Rys. 5. Moc i moment obrotowy silnika zasilanego benzyną oraz CNG (dla różnych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu)

Fig. 5. Power and torque of tested engine fueled by CNG (for sixth different ignition advance)

Wprowadzenie mieszaniny wodoru z metanem do układu zasilania badanego silnika zmniejsza jego moc w porównaniu z paliwem benzynowym. Moc maksymalna silnika zmierzona w trakcie prowadzonych badań była niższa od tej, którą silnik osiągał podczas zasilania go gazem ziemnym bez wprowadzenia korekty kąta wyprzedzenia zapłonu. Jedynie w przypadku gdy silnik był zasilany mieszaniną zawierającą 15% wodoru, uzyskano porównywalną z gazem ziemnym wartość mocy maksymalnej. Zmiany mocy rozwijanej przez badany silnik dla trzech mieszanin w porównaniu z benzyną oraz LPG przedstawiono na rysunku 7. Przyrosty mocy silnika w funkcji jego prędkości obrotowej nie są równomierne, różniąc się od siebie w zakresie średnich i wysokich prędkości obrotowych. Zjawisko to uwidaczniają przebiegi momentu obrotowego silnika.

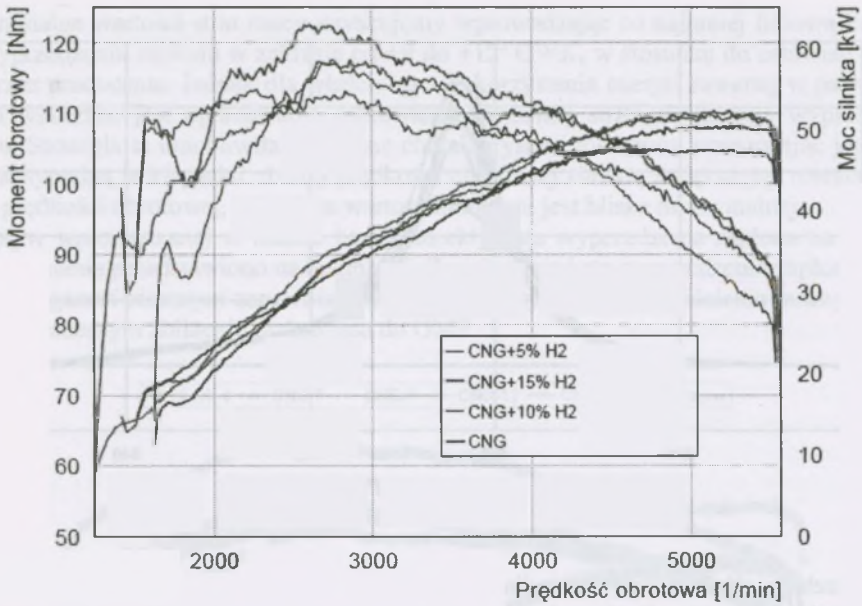


Rys. 6. Przebiegi ciśnienia wewnątrz cylindra dla benzyny, LPG i CNG przy różnych wartościach korekty kąta wyprzedzenia zapłonu (n = 2500 obr/min, obciążenie 100%, λ=1)
Fig. 6. In-cylinder pressure traces for petrol, LPG and CNG with different correction of ignition, (rpm = 2000 1/min, WOT, λ=1)

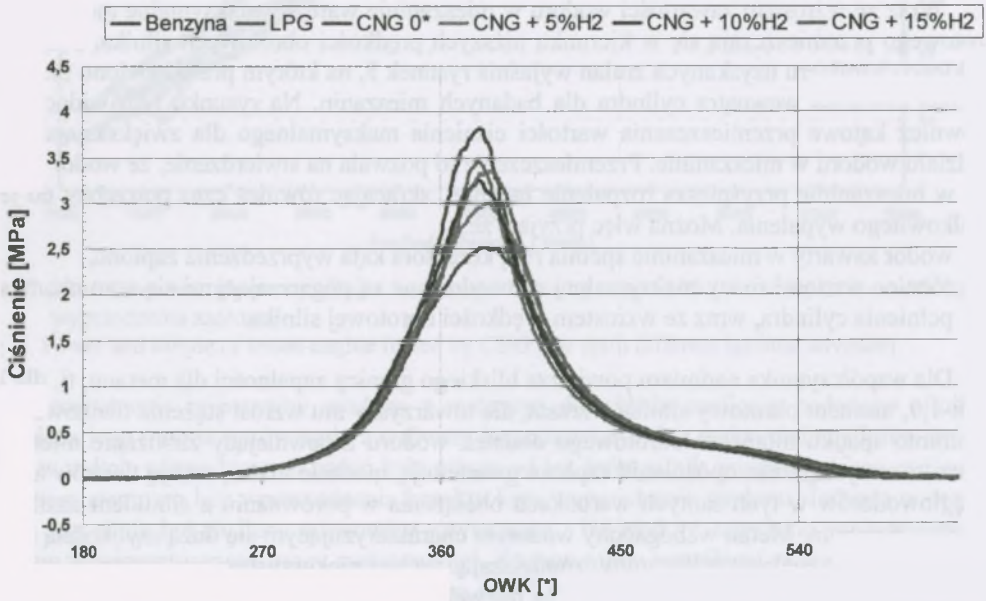
Wraz ze wzrostem zawartości wodoru w mieszaninie wartości maksymalne momentu obrotowego przemieszczają się w kierunku niższych prędkości obrotowych silnika. Przyczynę takiego charakteru uzyskanych zmian wyjaśnia rysunek 8, na którym przedstawiono przebiegi zmian ciśnienia wewnątrz cylindra dla badanych mieszanin. Na rysunku tym widoczne są również kątowe przemieszczenia wartości ciśnienia maksymalnego dla zwiększającego się udziału wodoru w mieszaninie. Przemieszczenie to pozwala na stwierdzenie, że wodór zawarty w mieszaninie przyspiesza rozpalenie ładunku, skracając również czas potrzebny do jego całkowitego wypalenia. Można więc przyjąć, że:

- wodór zawarty w mieszaninie spełnia rolę korektora kąta wyprzedzenia zapłonu,
- różnice wartości mocy maksymalnej spowodowane są pogarszającymi się warunkami napełnienia cylindra, wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika.

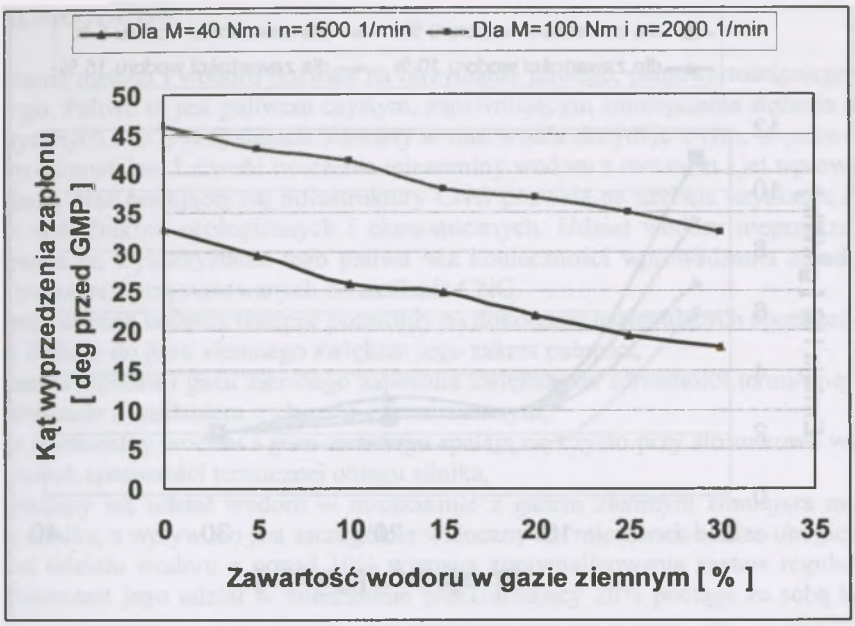
Dla współczynnika nadmiaru powietrza bliskiego granicy zapalności dla metanu, tj. dla λ = 1,8-1,9, moment obrotowy silnika wzrasta, ale towarzyszy mu wzrost stężenia tlenków azotu. Pomimo spadku momentu obrotowego dodatek wodoru zapewniający zubożenie mieszanki oraz towarzyszące mu opóźnienie zapłonu gwarantują znacznie niższą emisję tlenków azotu i węglowodorów w tych samych warunkach obciążenia w porównaniu z silnikiem zasilanym gazem ziemnym. Metan wzbogacony wodorem charakteryzującym się dużą szybkością spalania skraca czas spalania mieszaniny, zmniejszając wpływ niekorzystnej cechy gazu ziemnego, tj. przewlekłości jego spalania. Cecha ta pozwala na zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu w kierunku jego opóźnienia (rysunki od 9 do 12). W porównaniu z gazem ziemnym proces spalania mieszaniny metanowo-wodorowej przebiega bardziej efektywnie, sprawność termiczna silnika wzrasta wraz ze wzrostem udziału wodoru w mieszaninie, a jej maksymalna wartość jest uzyskiwana dla współczynnika nadmiaru powietrza λ = 1,55-1,65.



Rys. 7. Moc i moment obrotowy silnika zasilanego CNG oraz mieszanin metanu i wodoru
Fig. 7. Power and torque of tested engine fueled by CNG and hydrogen enriched methane

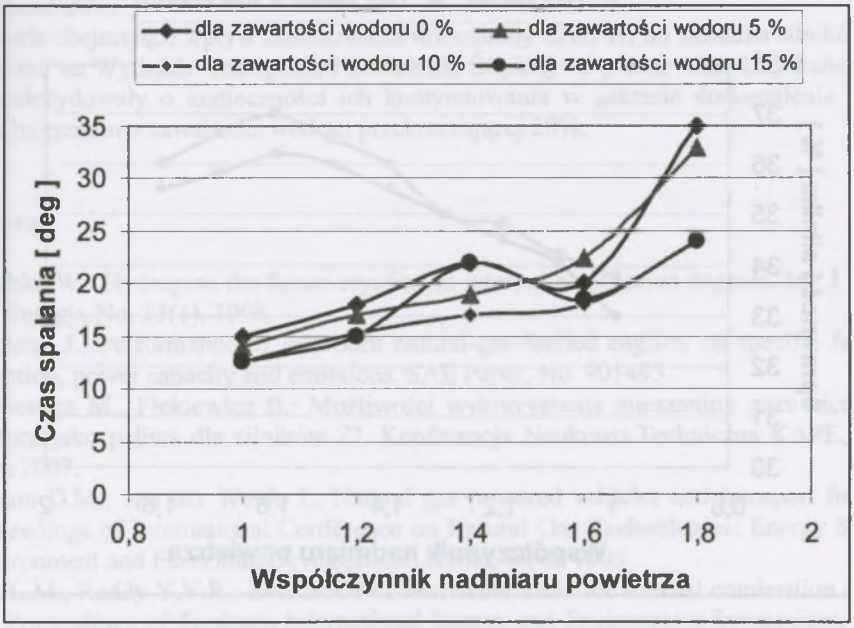


Rys. 8. Przebiegi ciśnienia wewnątrz cylindra dla benzyny, LPG, CNG i CNG wzbogaconego wodorem (n = 2000 obr/min, obciążenie 100%, λ=1)
Fig. 8. In-cylinder pressure traces for petrol, LPG, CNG and CNG enriched by Hydrogen (rpm = 2000 1/min, WOT, λ=1)



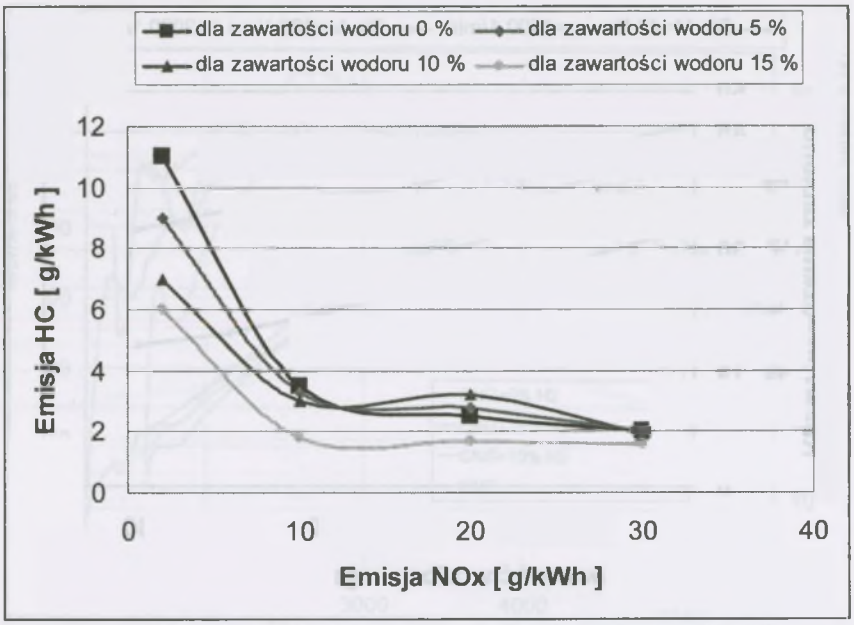
Rys. 9. Wartości kąta wyprzedzenia zapłonu odpowiadające maksymalnej wartości momentu obrotowego silnika dla mieszanin o różnej zawartości wodoru, λ=1

Fig. 9. Timing ignitron for maximum engine torque for various hydrogen mixtures, A/F=1

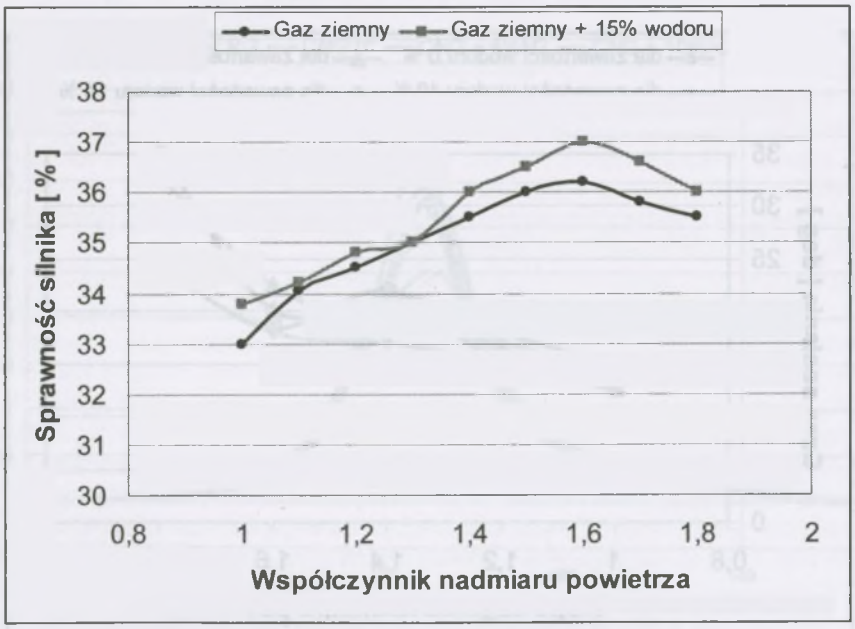


Rys. 10. Czas spalania mieszanin o różnej zawartości wodoru w zależności od wartości współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 10. Combustion time vs. A/F ratio for various hydrogen mixtures



Rys. 11. Stężenie HC w spalinach w zależności od stężenia NO_x dla różnej zawartości wodoru
Fig. 11. HC concentration vs. NO_x for various hydrogen mixture



Rys. 12. Sprawność termiczna silnika w zależności od współczynnika nadmiaru powietrza dla różnej zawartości wodoru w mieszaninie
Fig. 12. Thermal efficiency vs. A/F ratio for various hydrogen mixtures

5. PODSUMOWANIE

Mieszanie metanu i wodoru pozwala na otrzymanie nowego, pełnowartościowego paliwa silnikowego. Paliwo to jest paliwem czystym, zapewniającym zmniejszenie stężenia składników toksycznych i CO_2 w spalinach. Zawarty w nim wodór decyduje o tym, iż paliwo to jest częściowo odnawialne. Łatwość tworzenia mieszaniny wodoru z metanem i jej wprowadzenia do istniejącej oraz budującej się infrastruktury CNG pozwala na szybkie uzyskanie korzystniejszych wskaźników ekologicznych i ekonomicznych. Udział wodoru nieprzekraczający 15% pozwala na wykorzystanie tego paliwa bez konieczności wprowadzania zasadniczych zmian w pojazdach przystosowanych do zasilania CNG.

Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na dokonanie następujących spostrzeżeń:

- wodór dodany do gazu ziemnego zwiększa jego zakres palności,
- mieszanina wodoru i gazu ziemnego zapewnia zwiększenie sprawności termicznej silnika w porównaniu z zasilaniem wyłącznie gazem ziemnym,
- ubogie mieszaniny wodoru i gazu ziemnego spalają się czysto przy stosunkowo wysokich wartościach sprawności termicznej obiegu silnika,
- zwiększający się udział wodoru w mieszaninie z gazem ziemnym zmniejsza moc użyteczną silnika, a wpływ ten jest szczególnie widoczny dla mieszanek bardzo ubogich.

Wzrost udziału wodoru o ponad 10% wymaga zoptymalizowania nastaw regulacyjnych silnika, natomiast jego udział w mieszaninie przekraczający 20% pociąga za sobą konieczność:

1) opracowania nowych strategii zarządzania dawką paliwa i katem wyprzedzenia zapłonu,
2) optymalizacji wymiany ładunku.

Stwierdzono, że sprawność silnika zasilanego mieszaniną wodoru i gazu ziemnego może wzrosnąć od 5 do 7%, natomiast poziom emisji NO_x i CO można obniżyć o ponad 10%, a CO_2 o ponad 28%.

Badania obejmujące wpływ zastosowania mieszaniny CNG-H_2 do zasilania silników ZI są prowadzone na Wydziale Transportu Politechniki Śląskiej od ponad roku. Uzyskane wyniki badań zadecydowały o konieczności ich kontynuowania w zakresie doskonalenia procesu spalania mieszanin o zawartości wodoru przekraczającej 20%.

Literatura

1. Peschka W.: Hydrogen: the future cryofuel in internal combustion engines. Int. J. Hydrogen Energy, No. 23(1), 1998.
2. Klimstra J.: Performance of lean-burn natural-gas-fuelled engines on specific fuel consumption, power capacity and emissions. SAE Paper, No. 901495.
3. Flekiewicz M., Flekiewicz B.: Możliwości wykorzystania mieszaniny gazu ziemnego i wodoru jako paliwa dla silników ZI. Konferencja Naukowo-Techniczna KAPE, Jelenia Góra 2007.
4. Heaton D.M., van der Weide J.: Natural gas powered vehicles and transport fuels. Int. Proceedings of International Conference on Natural Gas Technologies: Energy Security, Environment and Economic Development, Kyoto, Japan 1993.
5. Das L.M., Reddy Y.V.R.: Evaluation of alternative fuels for internal combustion engines. Int. Proceedings of Terabzon International Energy and Environment Symposium, Turkey 1996.
6. Das L.M.: Fuel induction technique for a hydrogen operated engine. Int. J. Hydrogen Energy, No.15(11), 1990.

7. Das L.M.: Studies on timed manifold injection in hydrogen operated spark ignition engine: performance, combustion and exhaust emission characteristics. Ph.D. thesis, IIT Delhi 1987.
8. Tebelis T., Krepec T.: A concept of electronically controlled hydrogen-gas injector for high speed compression ignition engine. Int. Proceedings Hydrogen from Renewable Energy, Cape Canaveral 1985, p. 397-405.
9. Gupta A. : Experimental studies on a CNG operated engine with (I) pre-mixed charge and (II) gas injection. M. Tech. Thesis, Department of Mechanical Engineering, IIT Delhi, November 1996.
10. Mathur H.B., Das L.M.: Performance characteristics of a hydrogen fuelled S.I. engine using timed manifold injection. Int. J. Hydrogen Energy, No. 16, 1991.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Sławomir Luft

Praca wykonana w ramach projektu BK-285/RT 2/2007