

THE INFLUENCE OF HYDROGEN ADDITION TO METHANE FUEL ON POLLUTANT EMISSION AND COMBUSTION PERFORMANCE IN A SINGLE CYCLE IC ENGINE

Jan Kindracki

Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25
tel.: +(48-22) 660-52-17, fax: +(48-22) 825-05-65
e-mail: jkind@itc.pw.edu.pl

Abstract

The influence of addition of hydrogen to the methane fuel on the emission of pollutant created during combustion were experimentally studied. Experiments were conducted using a specially designed IC engine. Combustion performances were evaluated on the bases of the maximum combustion pressure and the rate of pressure rise. Concentration of pollutant was measured.

It was generally found that addition of hydrogen decreases the amount of emitted pollutant. Addition of hydrogen lowers the lean combustion limit of hydrocarbon mixtures, thus by lowering combustion temperature it decreases emission of nitrogen oxides and hydrocarbons.

BADANIA WPŁYWU DODATKU WODORU NA PRZEBIEG PROCESU SPALANIA I EMISJĘ W URZĄDZENIU REALIZUJĄCYM JEDEN CYKL PRACY SILNIKA TŁOKOWEGO.

Streszczenie

Zaostrzające się normy dotyczące emisji szkodliwych związków powstających w czasie pracy silnika spalinowego wyznaczają nowe ścieżki badań nad poprawą jakości spalania czy też konstrukcji silnika. Opisywane badania są próbą odpowiedzi na pytanie o zastosowanie alternatywnych paliw gazowych lub ich mieszanin dla współczynnika nadmiaru powietrza większego od jedności i wpływie na zmniejszenie emisji szkodliwych związków.

Badania zostały przeprowadzone na specjalnie zmodyfikowanym silniku czterosuwowym z zapłonem iskrowym, zasilanym paliwem gazowym – metanem. Zmodyfikowana głowica jednego z cylindrów pozwalała na pomiar przebiegu ciśnienia w cylindrze, skorelowanego z pomiarem kąta obrotu wału korbowego i czasu. Przeprowadzono pomiar emisji spalin.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły pozytywny wpływ dodatku wodoru do mieszaniny metanowo – powietrznej a także potwierdziły możliwość stosowania ubogich mieszanin i ich efektywnego spalania w silniku tłokowym. Praca ta jest kontynuacją badań autora w komorze o stałej objętości.

1. Wstęp

Nieustanny rozwój rynku silników spalinowych i zaostrzające się normy dotyczące emisji spalin powodują ciągłe poszukiwania nowych rozwiązań dotyczących konstrukcji silnika czy też samej organizacji procesu spalania wewnątrz cylindra silnika. Badania nad organizacją procesu spalania mogą być prowadzone w trzech etapach: w komorze o stałej objętości [[8]], maszynie realizującej pojedynczy cykl pracy czy też rzeczywistym silniku. Zmiana organizacji spalania może mieć na celu zwiększenie sprawności, zmniejszenia zużycia paliwa czy zmniejszenie emisji szkodliwych cząstek do atmosfery. Niniejszy tekst opisuje badania będące w drugim etapie, przeprowadzone na specjalnie zmodyfikowanym silniku czterosu-

wowym, który pozwala przeanalizować jeden cykl pracy silnika oraz przeprowadzić pomiar emisji spalin.

Istnieje kilka metod pozwalających kontrolować emisję poszczególnych składników spalin. Metody te, ze względu na miejsce kontroli można podzielić na dwie grupy: wewnątrz komory spalania i poza komorą spalania. Jedną z metod kontroli odbywającej się poza komorą spalania jest zastosowanie trójdrożnego katalizatora spalin, który redukuje NO_x i CO i jednocześnie dopala HC [[5],[6]]. Wymaga on precyzyjnej kontroli składu mieszanki która nie może znacznie odbiegać od składu stechiometrycznego ($\lambda=0,995\pm 1,05$). Pomiar składu mieszanki jest przeprowadzany pośrednio, przy użyciu sondy lambda, która mierzy stężenie tlenu w spalinach a następnie na tej podstawie obliczany jest skład mieszanki.

Drugą metodą jest recyrkulacja spalin (EGR), polegająca na wprowadzeniu ponownie części spalin z powrotem do cylindra [[1],[10],[12]]. Powoduje to zwiększenie ilości dwutlenku węgla i pary wodnej w świeżym ładunku, przez co zmniejszana temperatura w cylindrze (CO_2 i para wodna mają większe ciepło właściwe niż N_2 i O_2), dodatkowo mniejsza ilość tlenu w płomieniu obniża jego temperaturę a więc emisję NO_x .

Z metod kontroli wewnątrz cylindrowych można wyróżnić: wtrysk wody i wtrysk pary wodnej do cylindra. Pierwsza metoda jest szeroko opisana w literaturze m.in. przez Harringtona [[7]], Nichollsa [[9]] czy Satpova i Luksho [[11]]. Powoduje ona wzrost mocy silnika, obniżenie emisji NO_x i zwiększenie emisji CO. Podobne cechy wykazuje wtrysk pary wodnej (Chomiak i Liljenfeldt [[4]]), jednakże jest on droższy w wykonaniu niż wtrysk wody.

Jeszcze inną metodą jest zastosowanie szeroko dostępnego paliwa alternatywnego – gazu ziemnego, którego głównym składnikiem jest metan. Zastosowanie ubogiej mieszaniny metanowo – powietrznej pozwoli na zmniejszenie emisji (w stosunku do stechiometrii), zmniejszenie skłonności do spalania stukowego oraz zwiększenie stopnia sprężania. Niestety wraz ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza λ , maleje ciśnienie maksymalne (a z nim moc silnika), zmniejsza się prędkość spalania, pojawia się zjawisko wypadania zapłonów. Aby przeciwdziałać tym niekorzystnym cechom spalania ubogich mieszanin dodano (bezpośrednio do metanu) gazowego wodoru. W poniższych badaniach określono wpływ dodatku wodoru do metanu na parametry procesu spalania i emisję w procesie spalania w silniku ZI. Podobne badania były prezentowane przez: Bauera i Forest'a [[3]] czy Bade Shrestha i Karima [[2]].

2. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys.1. Główną jego częścią jest zmodyfikowany, czterocylindrowy silnik z zapłonem iskrowym, w którym używane są tylko dwa cylindry: jeden jako badawczy a drugi jako napędzający służący do zwiększenia prędkości obrotowej wału korbowego. Z oryginalnie wyposażonego silnika usunięto głowicę oraz rozrząd, dwa „nieużywane” tłoki a w ich miejsce wstawiono odpowiednie masy wyrównowazujące. Dla pozostałych pracujących cylindrów wykonano odpowiednie głowice, w których wykonano otwory na świece zapłonowe, czujnik ciśnienia, zawory dolotowy i wylotowy. Do układu chłodzenia silnika podłączono termostat wodny, którego zadaniem było utrzymanie temperatury bloku silnika możliwie zbliżonej do temperatury pracy rzeczywistego silnika.

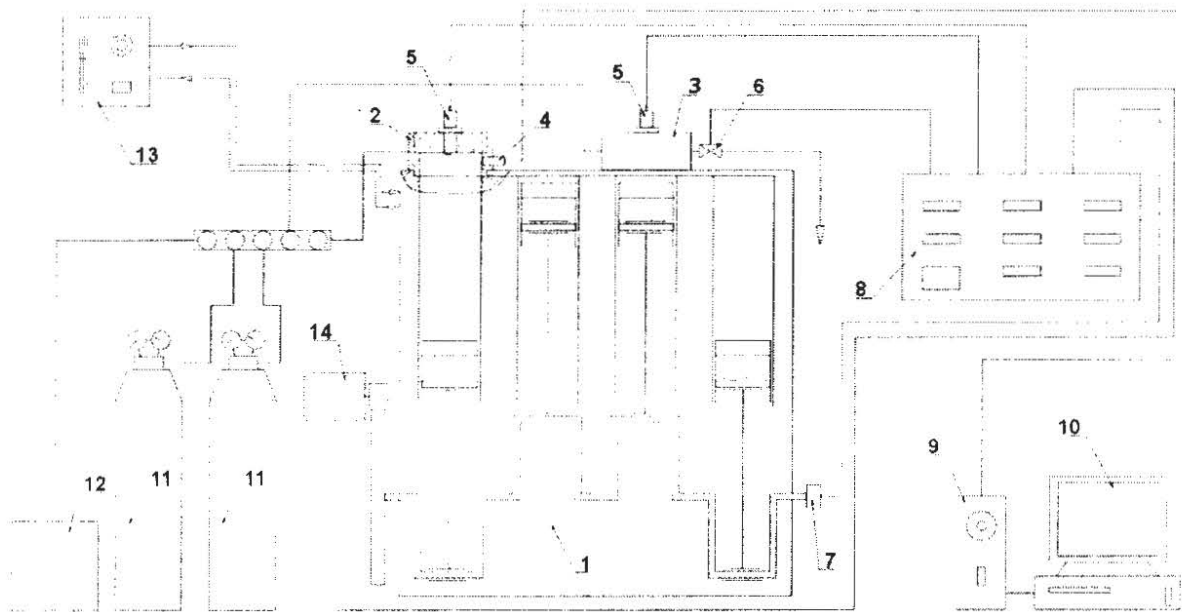
Tabela 1.

Srednica i skok cylindra (Bore and Stroke)	83x96 mm
Pojemność (Displacement)	583 cm ³
Stopień sprężania (Compression ratio)	10,14
Stosunek skok/średnica (Stroke/Bore Ratio)	1,15
Prędkość obrotowa (Speed)	600obr/min

Tabela 2.

Czujnik ciśnienia (Piezoelectric Transducer)	Kistler 6061B
Wzmacniacz (Charge Amplifier)	Kistler 5006
Anlizator gazowy (Gas Analyzer)	Beckman NO/NO _x Model 951A
Anlizator wielogazowy (Gas Analyzer)	Oliver K-4500

Cylinder badawczy został wyposażony w czujnik ciśnienia firmy Kistler a wał korbowy w czujnik kąta OWK. Pomiar ciśnienia jest skorelowany z pomiarem czasu i kąta OWK poprzez system kontroli silnika (układ ten pozwala na wybór żadanego kąta zapłonu dla obu cylindrów) i rejestrowany poprzez kartę pomiarową w komputerze. Do pomiaru emisji tlenków azotu użyto analizatora firmy Beckman (model 951A), a pomiaru pozostałych składników spalin analizatora wielogazowego Oliver K-4500.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik badawczy, 2 – cylinder badawczy, 3 – cylinder napędzający, 4 – czujnik ciśnienia, 5 – świeca zapłonowa, 6 – zawór elektromagnetyczny, 7 – czujnik OWK, 8 – układ kontroli silnika, 9 – wzmacniacz, 10 – komputer, 11 – butla z mieszaniną palną, 12 – pompa próżniowa, 13 – układ chłodzenia/grzania, 14 – rozrusznik.

Fig. 1. Schematic diagram of test stand: 1 - experimental engine, 2 - research cylinder, 3 - boosting cylinder, 4 - pressure sensor, 5 - spark plug, 6 - elektromagnetic valve, 7 - crank angle indicator, 8 - engine control system, 9 - amplifier, 10 - computer, 11 - cylinder with mixture, 12 - vacuum pump, 13 - heating/cooling system, 14 - starter.

3. Wyniki badań

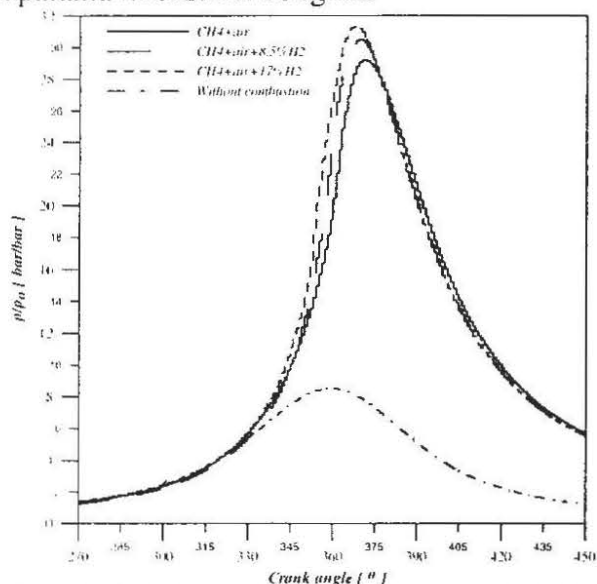
Przed przystąpieniem do pomiarów oba cylindry ustawiano w pozycji środkowej ($OWK=90^\circ$), pompą próżniową usuwano z nich powietrze a następnie napełniano odpowiednią mieszaniną palną. Cylinder napędzający był zawsze napełniany mieszaniną metanowo – powietrzną o współczynniku nadmiaru powietrza $\lambda = 1.0$, a cylinder badawczy mieszaniną metanowo – powietrzną o wybranym współczynniku λ dla jednej z trzech kompozycji:

- metan – powietrze dla $\lambda = 1.0 \div 1.4$
- metan – powietrze z dodatkiem 8.5% wodoru dla $\lambda = 1.2 \div 1.5$
- metan – powietrze z dodatkiem 17% wodoru dla $\lambda = 1.2 \div 1.6$

Mieszaniny wykonano w wysokociśnieniowych butlach, przynajmniej 24 godziny przed przeprowadzeniem badań. Po napełnieniu obu cylindrów do wybranego ciśnienia $p_0 = 1.7\text{bar}$, sygnał z układu sterowania uruchamia elektryczny rozrusznik silnika który zaczyna obracać wałem korbowym z prędkością $\sim 400\text{ obr/min}$. Po wykonaniu 4 obrotów dokonywany był zapłon w cylindrze napędzającym, który zwiększa prędkość obrotową do $\sim 600\text{ obr/min}$. Następnie w wybranym momencie (tłok w cylindrze badawczym przed GMP), zapalana była mieszanina testowa i dokonywano pomiaru ciśnienia.

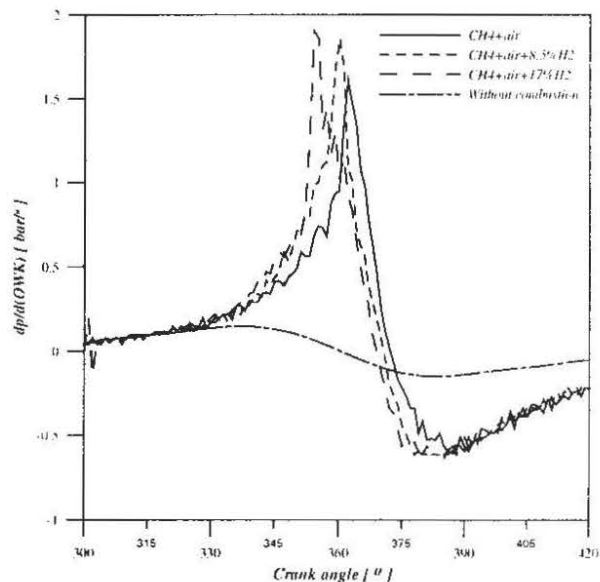
Rys. 2 przedstawia porównanie przebiegów ciśnienia w cylindrze silnika w czasie jego pracy dla wybranego współczynnika $\lambda = 1.3$, dodatek wodoru wpływa korzystnie na jego wielkość maksymalną a także przyspiesza osiągnięcie wartości maksymalnej. Pozwala to na przesunięcie kąta zapłonu w stronę GMP. Dodatkowo dla porównania pokazano przebieg ciśnienia w cylindrze w przypadku braku zapłonu.

Rys. 3 przedstawia przebieg szybkości narastania ciśnienia wyrażonego w barach na stopień OWK. **Rys. 4** i **Rys. 5** przedstawiają wpływ dodatku wodoru na maksymalne ciśnienie oraz maksymalną szybkość narastania ciśnienia w czasie spalania mieszaniny w cylindrze. Dodatek wodoru powoduje wzrost obu parametrów, ponadto przesuną granicę efektywnego spalania mieszanin ubogich.



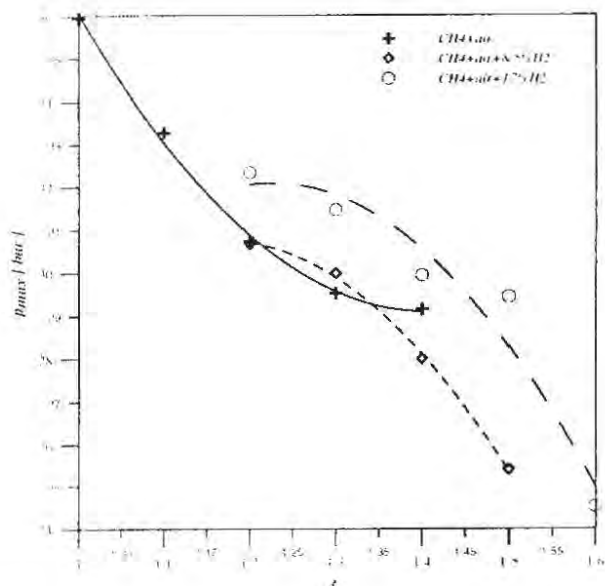
Rys. 2. Przebieg ciśnienia w komorze silnika badawczego podczas spalania mieszanin dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1.3$.

Fig. 2. Course of pressure during combustion of methane-air mixture for $\lambda = 1.3$ (lean mixture)



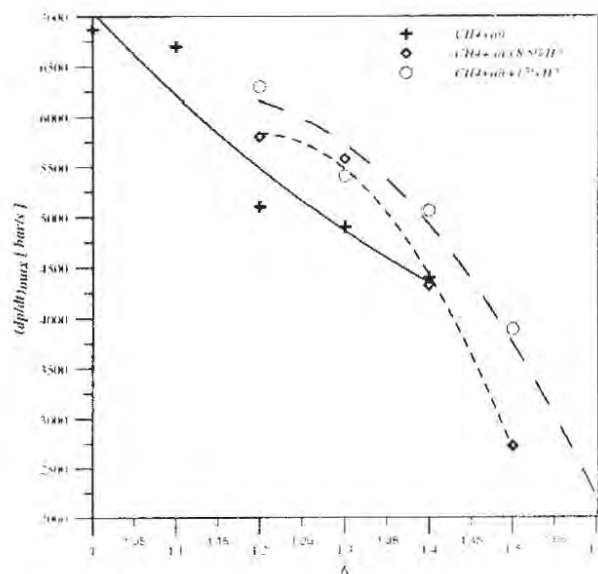
Rys. 3. Przebieg zmian szybkości narastania ciśnienia podczas spalania mieszanin dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1.3$.

Fig. 3. Course of rate of pressure rise for combustion of three composition mixture for $\lambda = 1.3$ (lean mixture)



Rys. 4. Porównanie maksymalnego ciśnienia w cylindrze podczas spalania mieszaniny metanowo-powietrznej w funkcji współczynnika λ .

Fig. 4. Comparison of maximum pressure for combustion of methane-air mixture with addition of hydrogen for different equivalence ratios.



Rys. 5. Porównanie maksymalnej szybkości narastania ciśnienia podczas spalania mieszaniny metanowo-powietrznej w funkcji współczynnika λ .

Fig. 5. Comparison of maximum rate of pressure rise for combustion of methane-air mixture with addition of hydrogen for different equivalence ratios.

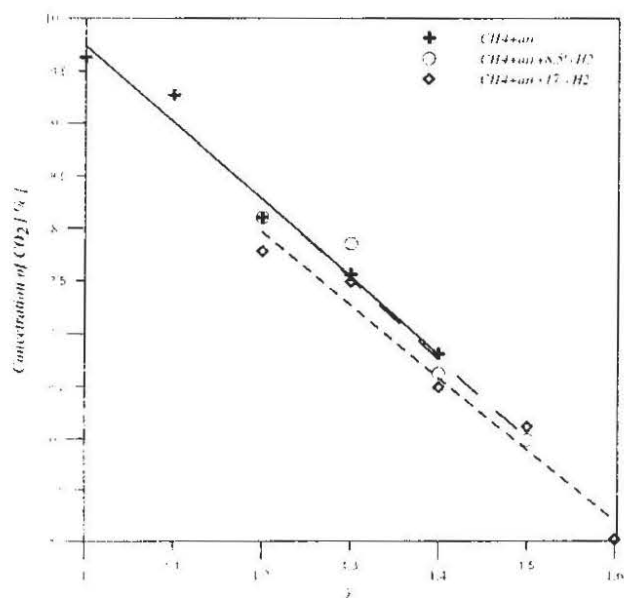
4. Pomiary emisji spalin

W czasie badań przeprowadzono pomiary emisji spalin. Do pomiaru tlenków azotu użyto analizatora NO/NO_x firmy Beckman (model 951A) a do pomiaru emisji tlenku węgla (CO), dwutlenku węgla (CO_2) oraz niespalonych węglowodorów (HC) użyto analizatora Oliver K-4500. Na Rys. 6 pokazano emisję CO_2 w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza λ . W przypadku mieszaniny z dodatkiem 17% wodoru do paliwa obserwuje się 5% spadek emisji, jednakże wiąże się to z tym że 17% (objętościowo) cząsteczek metanu zastąpiono wodorem i w związku z tym powstaje więcej pary wodnej a mniej CO_2 .

Rys. 7 pokazuje porównanie emisji tlenku węgla, dodatek wodoru dla $\lambda > 1.4$ zmniejsza emisję o około 20%. Na fakt zmniejszenia emisji wydaje się mieć główny wpływ zwiększona szybkość reakcji, dzięki zwiększonej prędkości spalania poprzez dodanie wodoru do paliwa. Rys. przedstawia emisję HC w funkcji λ , widać wyraźnie że dodatek 17% wodoru powoduje spadek emisji o około 10%.

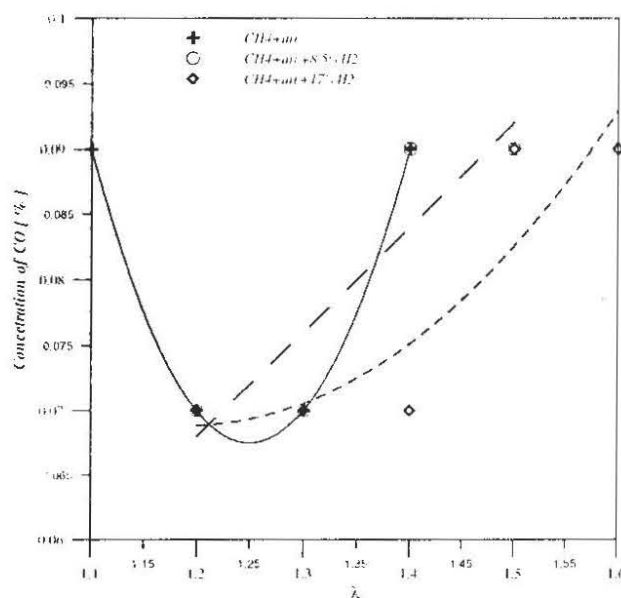
Rys. 9 przedstawia emisję tlenków azotu, dodatek wodoru do paliwa jakim jest metan najpierw powoduje zwiększenie emisji dotyczy to mieszanin dla $\lambda < 1.4$ a dla mieszanin uboższych $\lambda > 1.4$ powoduje spadek emisji. Dodatkowy wodór zawarty w mieszaninie palnej powoduje powstawanie większej ilości pary wodnej w cylindrze co korzystnie wpływa na emisję NO_x . Efekt dodatku pary wodnej do cylindra na tlenki azotu opisuje m.in. Chomiak i Liljenfeldt [14]

Dodatek wodoru do mieszanin ubogich powoduje jeszcze jeden efekt a mianowicie umożliwia ich stabilne i pełne spalanie w silniku w ciągu jednego suwu. Efekt ten powoduje kilkukrotnie większą prędkość spalania wodoru niż metanu. Niewielki więc dodatek wodoru do metanu pozwala na rozszerzenie granicy stabilnego spalania ubogiej mieszaniny w silniku. Spalanie mieszaniny ubogiej dodatkowo powoduje efekt zmniejszenia emisji szkodliwych związków takich jak niespalone węglowodory czy tlenki azotu.



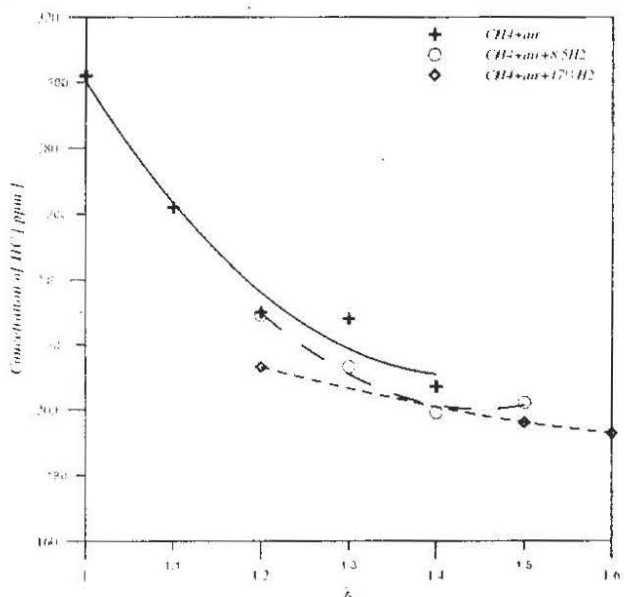
Rys. 6. Porównanie emisji CO_2 dla mieszanin z i bez dodatku wodoru w funkcji współczynnika λ .

Fig. 6. Comparison of CO_2 emission for methane-air mixture with and without addition of hydrogen as function λ .



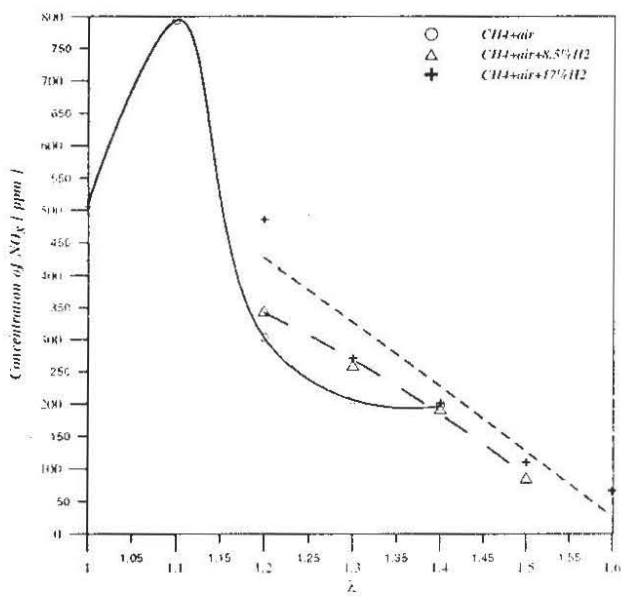
Rys. 7. Porównanie emisji CO dla mieszanin z i bez dodatku wodoru w funkcji współczynnika λ .

Fig. 7. Comparison of CO emission for methane-air mixture with and without addition of hydrogen as function λ .



Rys. 8. Porównanie emisji HC dla mieszanin z i bez dodatku wodoru w funkcji współczynnika λ .

Fig. 8. Comparison of HC emission for methane-air mixture with and without addition of hydrogen as function λ .



Rys. 9. Emisja tlenków azotu w funkcji współczynnika λ .

Fig. 9. Comparison of nitrogen oxide emission of methane-air mixture with and without addition of hydrogen as function λ .

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały pozytywny wpływ dodatku wodoru do metanu na parametry procesu spalania w silniku i jego emisję. Efekty te widoczne są zwłaszcza dla mieszanin ubogich zwiększając zarówno ciśnienie maksymalne w cylindrze i szybkość spalania

otwierając drogę do zastosowania spalania ubogich mieszanin metanowych. W przypadku mieszanin ubogich zaobserwowano jeszcze jeden efekt, zmniejszenie emisji NO_x oraz HC, co stanowi bardzo ważny efekt w ochronie środowiska naturalnego. Zastosowanie spalania mieszanin ubogich pozwoli na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa.

Do otrzymania pełnego obrazu wpływu dodatku wodoru do metanu podczas procesu spalania w silniku należy przeprowadzić badania na silniku zainstalowanym na hamowni podczas jego normalnej pracy. Badania takie pozwolą ocenić w pełni zalety tego rozwiązania, jego przydatności w przemyśle motoryzacyjnym.

Literatura

- [1] Abd-Alla, G.H.: "Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review", Energy Conversion and Management Volume: 45, Issue: 6, April, 2004, pp. 883-900.
- [2] Bade Shrestha S.O., Karim G.A.: "Hydrogen as an Additive to Methane for Spark Ignition Engine Applications" International Journal of Hydrogen Energy 24(1999), pp. 577-586
- [3] Bauer C.G., Forest T.W.: "Effect of Hydrogen Addition on the Performance of Methane-fueled Vehicles. Part I: Effect on S.I. Engine Performance", International Journal of Hydrogen Energy 26(2001), pp. 55-70
- [4] Chomiak Jerzy, Liljenfeldt W.: "Performance Analysis of a Steam Injected Diesel (STID) Engine"
- [5] Ciambelli, P.; Corbo, P.; Migliardini, F.: „Potentialities and limitations of lean de- NO_x catalysts in reducing automotive exhaust emissions”, Catalysis Today Volume: 59, Issue: 3-4, June 25, 2000, pp. 279-286.
- [6] Hanaki, Yasunari; Sekiba, Toru; Ishii, Mitsunori; Okada, Akihide; Ishizawa, Shizuo "Research on exhaust emission control characteristics of a natural gas vehicle -- Characteristics of methane oxidation reaction of three-way catalysts" JSAE Review Volume: 17, Issue: 3, July, 1996, pp. 259-265.
- [7] Harrington J.A.: "Water addition to gasoline manifold injection - effect on combustion, emissions, performance, and knock" SAE Paper 820314 (SAE VOL. 910).
- [8] Kindracki J., Sala K.: „Studies Of Influence Addition Of Hydrogen And Water Vapor On Combustion Performance And Nitrogen Oxide Emissions In Constant Volume Chamber.” Archiwum Combustionis – 23, No.3-4, pp.193 – 201.
- [9] Nicholls J.E., El-Messiri I.A., Newhall H.K.: "Inlet Manifold Water Injection for control of Nitrogen Oxides-Theory and Experiments" SAE Paper 690018 (SAE TRAN., VOL. 780).
- [10] Sasaki, Shizuo; Sawada, Daisaku; Ueda, Takanori; Sami, Hiroyuki: "Effects of EGR on direct injection gasoline engine", JSAE Review Volume: 19, Issue: 3, July 1, 1998, pp. 223-228.
- [11] Satpov, E.B. And Luksho, B.A.: "A Study on the Effect of Water in Fuel on the Performance of SI Engine", published in Engine Manufacturing in Russian, 1981.
- [12] Teodorczyk A., Przystek J.: „Analiza obliczeniowa wpływu recyrkulacji spalin na emisję NO_x w silniku o zapłonie iskrowym”, KONES '99 pp.253-260.