

Lukasz GRABOWSKI
Mirosław WENDEKER
Rafał SOCHACZEWSKI
Michał GĘCA

PTNSS-2013-SC-054

The study of hydrogen and gasoline mixtures combustion in a spark-ignition engine

Abstract: The paper includes the test results of supplying gasoline and a hydrogen-gasoline mixture to an engine. The energy equivalent of 10% and 20% gasoline was replaced by the energy equivalent of hydrogen fuel. The composition of the air-fuel mixture has been determined for excess air ratio $\lambda = 1$. The research hydrogen supply system has been installed in the EURO 5 vehicle, and the tests were performed on a chassis dynamometer. The combustion chamber pressure and concentration of exhaust gas components were examined. The study was performed in steady states defined by the engine speed and the pressure in the intake manifold. The results show that combustion is changed if hydrogen replaces the original fuel. It has been shown that the introduction of the hydrogen fuel increases the mean indicated pressure and changes heat release, and thus changes the angle of maximum pressure.

Keywords: hydrogen, engine, combustion

Badania procesu spalania mieszanin wodoru i benzyny w silniku o zapłonie iskrowym

Streszczenie: W artykule zawarto wyniki badań uzyskane podczas zasilania silnika benzyną oraz benzyną i wodorem. Ekwiwalent odpowiadający energetycznie 10 i 20 % benzyny zastępowano odpowiednikiem energetycznym paliwa wodorowego. Skład mieszanki paliwowo powietrznej ustalano dla współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda=1$. Badawczy system zasilania wodorem został zabudowany w pojeździe spełniającym normę EURO5, a badania wykonano na hamowni podwoziowej. W trakcie badań zarejestrowano przebieg ciśnienia w komorze spalania i stężenia składników spalin. Badania wykonano w stanach ustalonych pracy silnika zdefiniowanych przez prędkość obrotową oraz ciśnienie w kolektorze dolotowym. Z przeprowadzonych badań wynika, że zastąpienie paliwa oryginalnego wodorem zmienia przebieg procesu spalania. Wykazano, że wprowadzenie paliwa wodorowego zwiększa wartość średniego ciśnienia indykowanego oraz powoduje zmianę wywiązywania się ciepła a w efekcie zmianę kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego.

Słowa kluczowe: wódór, silnik spalinowy, spalanie

1. Wprowadzenie

Wzrost cen ropy naftowej przyczynia się do zwiększenia wykorzystania paliw alternatywnych. Scenariusz rozwoju, prezentowany przez Dyrektoriat Generalny Energii i Transportu UE, zakłada w 2020 roku udział substytucji benzyny i oleju napędowego na poziomie 23%, w tym wodoru na poziomie 5%. Dlatego też rozwój silników spalinywych jest uwarunkowany między innymi przez restrykcyjne przepisy dotyczące emisji składników toksycznych spalin [1]. W chwili obecnej ze względu na wymogi określające ograniczenie emisji składników spalin (EURO 5, EURO 6) istnieje konieczność dostosowania parametrów algorytmu sterującego w celu uzyskania jak najmniejszej emisji zanieczyszczeń do atmosfery i odpowiedniej mocy silnika. Prognozy przedstawione przez organizację EARPA (European Automotive Research Association – Europejski Związek Ośrodków Badawczych Pojazdów) przewidują, że po wprowadzeniu norm EURO V, kolejnym etapem będzie już tylko obniżenie limitów zużycia paliwa. Dlatego

niezbędne jest zmniejszenie emisji pochodzącej z pojazdów oraz zwiększenie sprawności silników. Główne kierunki badań dotyczą: bezpośredniego wtrysku paliwa, układów oczyszczania spalin, napędów elektrycznych oraz zastosowania paliw alternatywnych. W przypadku silników z zapłonem iskrowym rozpowszechnione jest stosowanie paliw gazowych (LPG, CNG). Kolejnym krokiem, który znajduje się obecnie w fazie badań, to zastosowanie wodoru do zasilania silników [1][2][3]. Aktualnie można wyróżnić trzy podstawowe kierunki rozwoju zastosowań wodoru do napędu pojazdów: wykorzystanie wodorowych ogniw paliwowych, całkowite zastąpienie wodorem benzyny lub oleju napędowego w silnikach spalinowych, użycie wodoru jako dodatku do paliwa w celu usprawnienia procesu spalania.

W literaturze można znaleźć wiele opracowań, które dotyczą spalania mieszanek ubogich zawierających wódór. W pracy [4] wykazano pozytywny wpływ dodatku wodoru na niepowtarzalność procesu spalania, sprawność cieplną oraz emisję składników toksycznych spalin. Wyniki dotyczące zagad-

nienia spalania mieszaniny benzyny oraz wodoru zostały zawarte w pracy [5]. Autor prowadził badania na silniku jednocylindrowym. Wykazał, że dodawanie wodoru przesunęło granicę palności mieszanek ubogich oraz zwiększyło prędkość propagacji płomienia. Przytoczone przykłady dotyczą zastosowania wodoru, gdzie wymagane jest opracowanie nowej konstrukcji silnika oraz nowego układu sterowania wtryskiem paliwa. Innym rozwiązaniem dotyczącym zastosowania wodoru do zasilania silników jest przystosowanie już eksploatowanych pojazdów. Prowadzone w tym zakresie prace związane są zabudową nowego systemu sterowania i zasilania paliwem wodorowym. W tym przypadku, ze względu na właściwości wodoru, wymagana jest modernizacja silnika, aby uniknąć spalania stukowego. Natomiast w przypadku częściowego zastąpienia benzyny wodorem nie ma potrzeby dokonywania zmian konstrukcyjnych silnika. Wymaga to jednak wyjaśnienia wpływu obecności paliwa wodorowego w mieszance głównej na proces roboczy silnika o zapłonie iskrowym zasilanego dwupaliwowo [6].

Celem niniejszej pracy było określenie w/w wpływu w warunkach eksploatacyjnych.

2. Stanowisko badawcze oraz zakres badań

Badania wykonano na hamowni podwoziowej firmy MAHA FPS 2700/5500. Hamownia składa się z zestawu rolkowego ze zintegrowanym sterowaniem i jednostką pomiarową. Dodatkowo hamownia wyposażona jest w dmuchawę w celu zapobiegania przegrzania się silnika. Urządzenie umożliwia ciągły pomiar mocy dynamiczny i statyczny oraz symulację obciążenia przy stałej prędkości obrotowej.



Rys. 1. Pojazd badawczy na stanowisku pomiarowym

Fig. 1 Research vehicle on a test stand

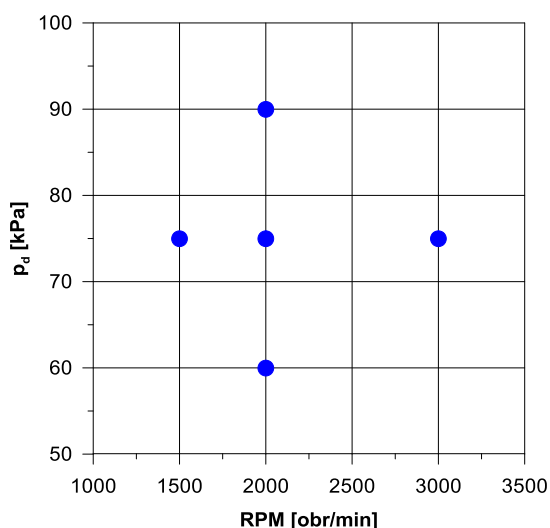
Table 1 A14XER engine technical data [8]

Tab. 1 Specyfikacja silnika A14XER [8]

Silnik	1.4 ecoFLEX
Oznaczenie	A14XER
Typ	benzynowy
Liczba cylindrów	4
Pojemność, [cm ³]	1398
Moc/prędkość obrotowa, [KM]/[obr/min]	100/6000
Moment obrotowy/ prędkość obrotowa, [Nm]/[obr/min]	130/4000
Średnica cylindra, [mm]	73,4
Skok tłoka, [mm]	82,6
Stopień sprężania, [-]	10,5
Liczba zaworów	16
Norma emisji spalin	Euro 5
Zastosowanie	Opel Corsa D

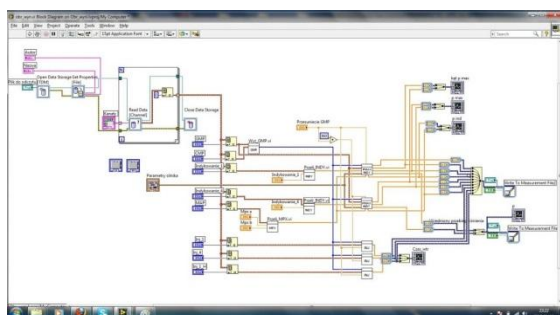
Obiektem badań był pojazd Opel Corsa D, wyposażony w silnik o zapłonie iskrowym o pojemności 1398 cm³ i mocy 100 KM. Czterocylindrowa jednostka napędowa z dwoma wałkami rozrządu DOHC spełnia normę emisji Euro 5. Posiada bezstopniową regulację faz rozrządu i zmienną długość kolektora dolotowego. Silnik został wyposażony w reaktor katalityczny. Główne parametry obiektu badawczego przedstawiono w tabeli 1. Nie dokonano żadnych zmian konstrukcyjnych silnika, silnik doposażono w układ zasilania sekwencyjnym wtryskiem wodoru.

Badania wykonano w stanach ustalonych pracy silnika w punktach pomiarowych wg schematu zamieszczonego na rysunku 2. Punkty pomiarowe określono na podstawie wielopoziomowego ortogonalnego planowania eksperymentu. Badania przeprowadzono dla różnych prędkości obrotowych i różnych obciążeń silnika, zdefiniowanych przez ciśnienie w kolektorze dolotowym. Na wykresach przedstawiono wyniki opisane w następujący sposób pi 2000/75 – co oznacza średnie ciśnienie indykowane w cylindrze zarejestrowane przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min i obciążeniu 75 kPa w kolektorze dolotowym.



Rys. 2. Plan badań weryfikacyjnych
Fig. 2 Planning the verification study

W trakcie badań silnik był zasilany benzyną oraz benzyną i wodorem. Ekwiwalent odpowiadający energetycznie 10 i 20 % benzyny zastępowano odpowiednikiem energetycznym paliwa wodowego. Wartość współczynnika nadmiaru powietrza ustalono na $\lambda = 1$. Każdy z punktów pomiarowych powtarzano dwukrotnie. W trakcie badań zarejestrowano ciśnienie w komorze spalania i emisję składników spalin. Wyniki zarejestrowano za pomocą kart pomiarowych 9215 i programu opracowanego w środowisku LabView 8.1 (ang. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) firmy National Instruments. Wyniki pomiarów ciśnienia indykowanego rejestrowano z częstotliwością 22 kHz. Oprogramowanie do analizy wyników badań umożliwiło na wyznaczenie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego, ciśnienia maksymalnego oraz kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego z około 1000 cykli roboczych silnika badawczego. Widok diagramu programu do analizy danych przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Diagram blokowy programu do analizy danych

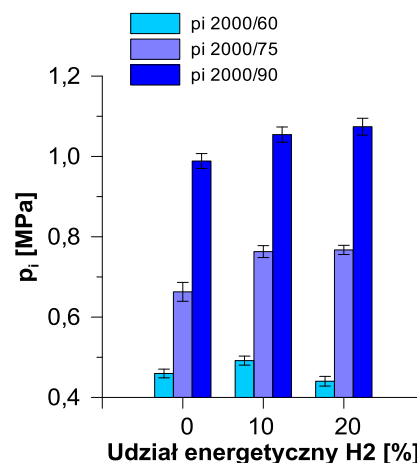
Fig. 3 Block schematic of the data analysis software

3. Wyniki badań

W efekcie przeprowadzonych badań stanowiących uzyskano przebiegi czasowe ciśnienia indykowanego w komorze spalania. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki analizy ciśnienia indykowanego. Dotyczą one średniego ciśnienia indykowanego, ciśnienia maksymalnego w cylindrze oraz kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego od obciążenia, prędkości obrotowej silnika i udziału energetycznego paliwa wodowego.

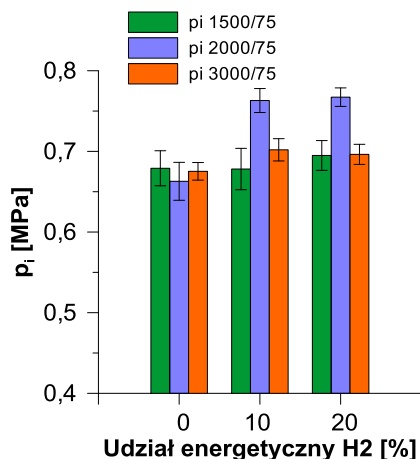
Porównanie średniego ciśnienia indykowanego w cylindrze dla stałej prędkości obrotowej silnika i zmiennego obciążenia (rysunek 4) wykazało wzrost o około 10-15 % ciśnienia dla średniego i maksymalnego obciążenia silnika wraz z zwiększaniem udziału energetycznego paliwa wodowego (10% i 20%). Dla małego obciążenia (p_i 2000/60) 10% udział energetyczny wodoru wywołuje wzrost o około 7% wartości średniego ciśnienia indykowanego, natomiast dalsze zwiększanie udziału wodoru spowodowało zmniejszenie ciśnienia o około 4% w porównaniu z zasilaniem benzyną.

Analiza średniego ciśnienia indykowanego przy stałym obciążeniu i zmiennej prędkości obrotowej silnika (rysunek 5) wykazała największe różnice dla średniej prędkości obrotowej wraz ze zwiększaniem udziału paliwa gazowego (o około 15%). Natomiast dla małej i dużej prędkości obrotowej dodatek paliwa wodowego ma niewielki wpływ na ciśnienie indykowane. Różnice wynoszą maksymalnie około 4%. Jest to spowodowane brakiem korekty regulacyjnej kąta wyprzedzenia zapłonu przy jednoczesnej zmianie właściwości mieszaniny palnej.



Rys. 4. Zależność średniego ciśnienia indykowanego od obciążenia dla stałej prędkości obrotowej silnika

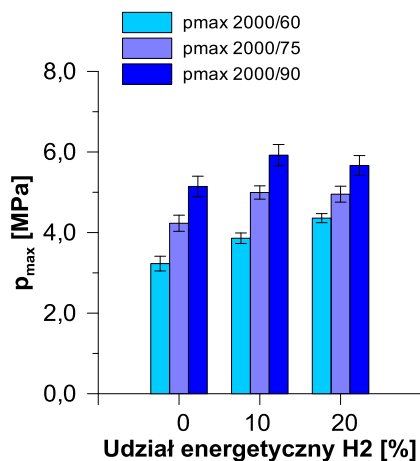
Fig. 4 Indicated mean effective pressure (IMEP) and load at the constant velocity



Rys. 5. Zależność średniego ciśnienia indykowanego od prędkości obrotowej dla stałego obciążenia silnika

Fig. 5 IMEP and velocity at the constant load

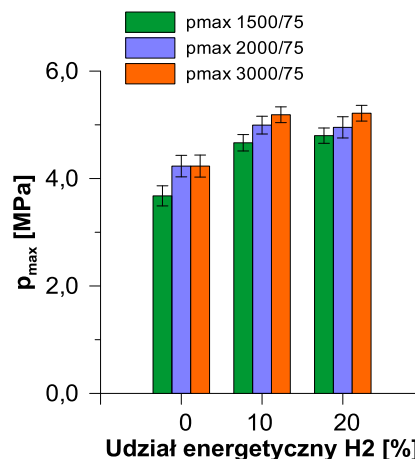
Wprowadzenie paliwa wodorowego do składu mieszanki palnej zwiększa wartość średniego ciśnienia indykowanego. Wynika to z właściwości wodoru – laminarna prędkości spalania wodoru wynosi około 2 m/s, natomiast dla benzyny około 0,4 m/s. Spalanie wodoru zachodzi z większą prędkością i wywołuje więcej zderzeń na poziomie molekularnym niż cięższe molekuly węglowodorowe.



Rys. 6. Zależność maksymalnego ciśnienia w cylindrze od obciążenia dla stałej prędkości obrotowej silnika

Fig. 6 Maximum cylinder pressure and load at the constant velocity

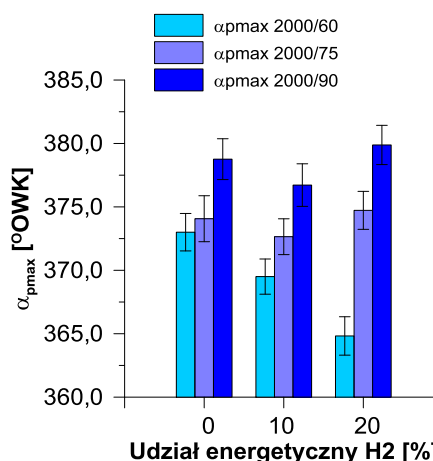
Analiza ciśnienia maksymalnego w komorze spalania (rysunek 6 i 7) wykazała we wszystkich punktach wzrost wartości tego wskaźnika wraz z wprowadzaniem udziału paliwa wodorowego w mieszance palnej. W porównaniu do zasilania benzyną obserwowany jest wzrost nawet o około 30% ciśnienia maksymalnego dla 20% udziału wodoru.



Rys. 7. Zależność maksymalnego ciśnienia w cylindrze od prędkości obrotowej dla stałego obciążenia silnika

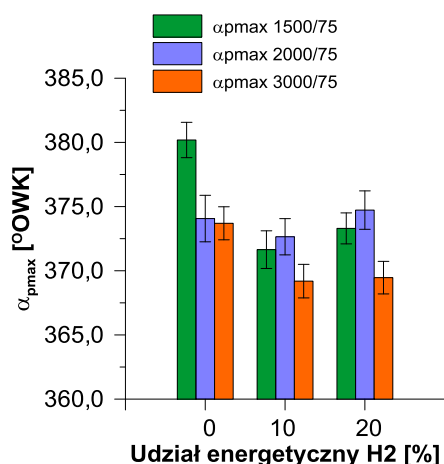
Fig. 7 IMEP in the cylinder and velocity at the constant load

W przypadku kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego (rysunek 8 i 9) dla średniej prędkości obrotowej i małego obciążenia silnika zwiększanie udziału paliwa wodorowego powoduje przesunięcie maksymalnego ciśnienia bliżej GMP. Dla udziału 20% wodoru maksimum ciśnienia przesuwają się o około 8°OWK. W pozostałych punktach pomiarowych 10% udział energetyczny sprawia że maksimum ciśnienia ulega przesunięciu bliżej GMP. Natomiast dalsze zwiększanie udziału wodoru – 20%, wywołuje niewielkie opóźnienie o około 1% wystąpienia kąta maksymalnego ciśnienia w porównaniu do zasilania benzyną.



Rys. 8. Zależność kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego od obciążenia dla stałej prędkości obrotowej silnika

Fig. 8 Crank angle for the maximum pressure and load at the constant velocity



Rys. 9. Zależność kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego od prędkości obrotowej dla stałego obciążenia silnika

Fig. 9 Crank angle for the maximum pressure and velocity at the constant load

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych sformułowano następujące wnioski dotyczące wpływu dodatku paliwa wodorowego na pracę silnika o ZI, zamontowanego w pojeździe:

- wprowadzenie paliwa wodorowego do składu mieszanki palnej zwiększa wartość średniego ciśnienia indykowanego,
- dyfuzyjność wodoru powoduje duże przyrosty ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie maksymalnego ciśnienia w komorze spalania,
- wprowadzenie paliwa wodorowego do komory spalania powoduje zmianę przebiegu wywiązywania się ciepła, a w efekcie zmianę kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego; dla średniej prędkości obrotowej i małego obciążenia silnika zwiększanie udziału paliwa wodorowego powoduje przesunięcie maksymalnego ciśnienia bliżej GMP – o około 8°OWK,
- udział wodoru korzystnie wpływa na zmniejszenie niepowtarzalności cyklowej ciśnienia maksymalnego w komorze spalania oraz kąta wystąpienia tego ciśnienia,
- w przypadku średniego ciśnienia indykowanego jego niepowtarzalność zwiększyła się w porównaniu do zasilania benzyną w 60% punktów pomiarowych.

Bibliography/Literatura

- [1]. Halter F., Foucher F., Moreau B., Mounaïm-Rousselle C.: Combined effects of hydrogen addition and dilution in a spark-ignition engine. THIRD EUROPEAN COMBUSTION MEETING ECM 2007.
- [2]. Sena Asok K., Wang J., Huang Z.: Investigating the effect of hydrogen addition on cyclic variability in a natural gas spark ignition engine: Wavelet multiresolution analysis. Applied Energy 88 (2011) 4860–4866.
- [3]. Wong YK, Karim GA. An analytical examination of the effects of hydrogen addition on cyclic variations in homogeneously charged compression-ignition engines. Int J Hydrogen Energy 2000;25(12):1217–24.
- [4]. Bauer CG, Forest TW. Effect of hydrogen addition on the performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S.I. engine performance. Int J Hydrogen Energy 2001;26(1):55–70.
- [5]. Ma F., Ding S., Wang Y., Wang J., Zhao S.: Study on combustion behaviors and cycle-by-cycle variations in a turbocharged lean burn natural gas S.I. engine with hydrogen enrichment. international journal of hydrogen energy 33 (2008) 7245–7255.
- [6]. Varde, K. S., Combustion characteristics of small spark ignition engines using hydrogen supplemented fuel mixtures, SAE Preprints, n 810921, 7 p, 1981.
- [7]. Kanti R. M., Kawahara N., Tomita E.: Visualization of Knocking Combustion in a Hydrogen Spark-Ignition Engine. 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010.
- [8]. <http://gmpowertrain.com>

Łukasz Grabowski, PhD, Eng. - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology. *Dr inż. Łukasz Grabowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej*



Mirosław Wendeker, Prof. DSc., Ph.DEng. – head of the Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion Systems, in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology. *Prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker – kierownik Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.*



Rafał Sochaczewski, PhD, Eng. - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology. *Dr inż. Rafał Sochaczewski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej*



Michał Gęca, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology. *mgr inż. Michał Gęca – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej*

