

Grzegorz BARAŃSKI  
Miroslaw WENDEKER  
Michał GĘCA  
Michał BIAŁY

PTNSS–2013–SC–060

## Effect of intake hydrogen addition on the performance and emission characteristics of a spark-ignition gasoline engine

*Abstract: The tests were carried out for four-cylinder, four-stroke spark-ignition engine C20LE Holden for 7 various operating points for speeds from 1500 to 3900 rpm. The energy share of a hydrogen fuel for the engine was 0, 5, 10, and 20%. Exhaust gas components (CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>) were analysed. The mean indicated pressure and the maximum pressure in the combustion chamber of the engine running under steady conditions was also registered. A reduction in CO<sub>2</sub> and HC emissions and increase of NO<sub>x</sub> in certain operating conditions for the engine compared to its original fuel supply was shown. Hydrogen addition has an influence on crank angle peak pressure and its value.*

Keywords: hydrogen, gasoline, combustion, emission, SI engine

### Badania stanowiskowe wpływu dodatku wodoru do układu dolotowego silnika o zapłonie iskrowym na proces roboczy

*Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań stanowiskowych silnika HOLDEN C20LE zasilanego dwoma paliwami (benzyną i wodorem). Procentowy udział energetyczny paliwa wodorowego w mieszaninie palnej wynosił 0, 5, 10 i 20%. Badania przeprowadzono w stanach ustalonych dla 7 punktów pracy dla prędkości obrotowej w zakresie od 1500 do 3900 obr/min. W trakcie badań rejestrowano ciśnienie w komorze spalania i emisję związków w spalinach. Analizie poddano stężenie związków w spalinach, średnie ciśnienie indykowane, kąt wystąpienia ciśnienia maksymalnego i wartość ciśnienia maksymalnego. Badania wykazały, że dodatek wodoru ma istotny wpływ na analizowane parametry.*

Słowa kluczowe: wodór, benzyna, spalanie, emisja, silnik o ZI

## 1. Wstęp

Plany niezależnienia się od paliw wytwarzanych na bazie nieustannie drożejącej ropy naftowej skłaniają naukowców do opracowywania nowych technologii, wykorzystujących paliwa alternatywne do różnego rodzaju zastosowań. Jednym z takich paliw jest wodór, który może być otrzymywany na przykład drogą gazyfikacji biomasy (odpadów lub celowej produkcji rolnej) lub elektrolizy wody wykorzystując do tego celu energię elektryczną wyprodukowaną z energii solarnej. Ma to szczególne znaczenie z uwagi na obecnie nierozwiniętą infrastrukturę dystrybucji wodoru. Czysty wodór jest doskonałym paliwem zarówno do zasilania wodorowych ogniw paliwowych jak i silników spalinowych. Aktualnie można wyróżnić trzy podstawowe kierunki rozwoju zastosowań wodoru do napędu pojazdów:

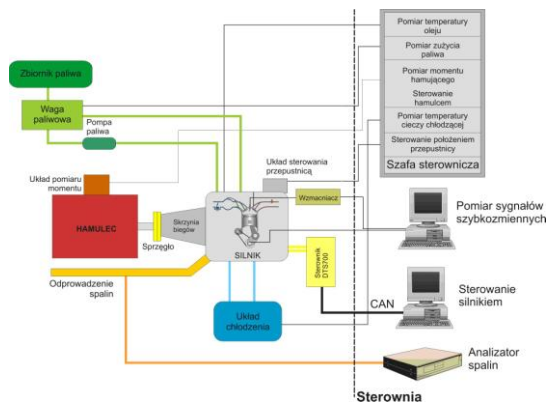
- wykorzystanie wodorowych ogniw paliwowych,
- całkowite zastąpienie wodorem benzyny lub oleju napędowego w silnikach spalinowych,
- użycie wodoru jako dodatek do paliwa w celu usprawnienia procesu spalania.

Tematyka zasilania wodorem tłokowych silników jest powszechnie znana [1], [2] [3], [4], [5]. Badano parametry spalania wodoru w silniku przy zasilaniu gaźnikowym, wtrysku pośrednim do kolektora dolotowego oraz wtrysku bezpośrednim do komory spalania. Przykładem może być BMW serii 7 posiadający dwunastocylindrowy silnik o mocy 260 KM, który jest dostępny dla wybranych klientów w Europie i Stanach Zjednoczonych od 2007 roku [6]. Mazda również opracowała system zasilania wodorem silnika Wankla. Należy przy tym zauważyć, że oznaczało to opracowanie całkowicie nowej konstrukcji silnika. Najbardziej praktyczna wydaje się być ostatnia propozycja, ponieważ umożliwia w znacznym stopniu poprawę procesu roboczego silnika przy zapewnieniu wymaganych osiągnięć oraz obniżenia kosztów eksploatacji. Nie wymaga się tutaj zastosowania nowej konstrukcji silnika, tylko doposażenia układu paliwowego w układ zasilania wodorem.

## 2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym Katedry Silników Spalinowych i Transportu Politechniki Lubelskiej. Schemat stanowiska hamownianego pokazano na rys. 2.1. W części silnikowej stanowiska zamontowany jest

hamulec elektryczny typu SAK-670 N firmy VEB Elbtalwerk wraz z układem zasilania elektrycznego, silnik badawczy, nastawnik przepustnicy, układ regulujący temperaturę cieczy chłodzącej, układ odprowadzania spalin, oraz układ wentylacji pomieszczenia. Sterowany mikroprocesorowo układ regulacji temperatury cieczy chłodzącej ADAM 5510 umożliwia utrzymanie żadanego stanu cieplnego silnika zadawanego z panelu sterującego. Obciążenie silnika realizowane jest nastawnikiem przepustnicy PTT-20 sterowanym z modułu sterownika przepustnicy AMX 201 firmy Automex. Stanowisko umożliwia zasilanie silnika badawczego benzyną, gazem LPG, CNG oraz H<sub>2</sub>.



Rys. 2.1. Schemat stanowiska hamownianego  
Fig. 2.1. Engine test bed scheme

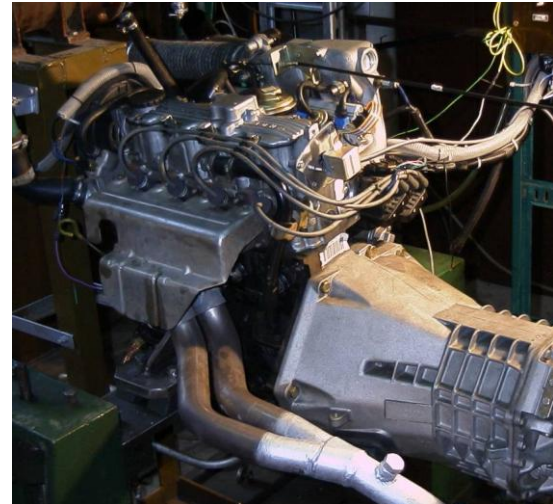
W sterowni znajdują się układy sterujące, nadzorujące i rejestrujące pracę zarówno hamulca, silnika jak i pozostałych systemów wykonawczych i pomiarowych. Pomiar momentu obrotowego silnika realizuje sterownik hamulca AMX 231 firmy Automex.

## 2.1. Obiekt badań

Obiektem badań był czterocylindrowy, czterosuwowy silnik w układzie rzędowym C20LE Holden (rys. 2.1). Silnik seryjnie wyposażony jest w wielopunktowy wtrysk benzyny do kolektora dolotowego. Pojemność skokowa wynosi 1998 cm<sup>3</sup>, stopień sprężania 8,8. Silnik posiada dwa zawory na cylinder, które napędzane są wałkiem rozrządu za pośrednictwem popychaczy hydraulicznych. Fazy rozrządu silnika zostały przedstawione w tabeli 2.1. Zapłon realizowany jest przez bezrozdzielczowy układ zapłonowy DIS.

Tab. 2.1. Fazy rozrządu silnika C20LE  
Tab. 2.1. Holden C20LE engine valve timing

	Otwarcie	Zamknięcie	Kąt otwarcia
Zawór dolotowy	23° przed GMP	71° po DMP	274°
Zawór wylotowy	60° przed DMP	35° po GMP	274°



Rys. 2.2. Obiekt badań na stanowisku  
Fig. 2.2. Holden C20LE engine

## 2.2. Układy zasilania: benzyny i wodoru

Silnik zasilano:

- 1) wielopunktowym wtryskiem benzyny – oryginalny układ wtrysku zabudowany na silniku,
- 2) wielopunktowym, sekwencyjnym wtryskiem gazu H<sub>2</sub> – zawierający: butle, elektrozawory, reduktor oraz wtryskiwacze Planijet.

Wszystkie układy zasilania sterowane były za pomocą sterownika laboratoryjnego oraz współpracującego z nim programu komputerowego. Komunikacja pomiędzy sterownikiem a komputerem PC odbywała się za pomocą protokołu transmisji CAN. Urządzenia to wraz z oprogramowaniem posłużyło do regulacji parametrów pracy silnika takich jak: czas trwania wtrysku, kąt początku wtrysku, kąt wyprzedzenia zapłonu, położenie zaworu powietrza dodatkowego.

Sterownik umożliwia:

- pomiar sygnałów z czujników pokładowych (ciśnienie w kolektorze, położenie przepustnicy, temperatura silnika, sygnały z wąsko- i szeroko-zakresowych czujników stężenia tlenu),
- sterowanie wtryskiwaczami,
- sterowanie zapłonem bezpośrednio lub pośrednio poprzez układ DIS,
- sterowanie innymi elementami wykonawczymi np. zaworem powietrza dodatkowego.

Sterowanie odbywa się z rozdzielczością zapłonów, czyli 4 razy na cykl.

## 2.3. Układy pomiarowe

Akwizycję sygnałów pomiarowych realizowano za pomocą układu składającego się z podstawy montażowej National Instruments CompactDAQ 9172 wraz z kartami pomiarowymi NI 9215 i notebooka z oprogramowaniem do rejestracji i obróbki

danych. W podstawie montażowej, w zależności od potrzeb, można zamontować do ośmiu kart pomiarowych, co umożliwi rejestrację do 32 sygnałów pomiarowych.

Rejestrację danych i obróbkę wstępną realizowano z wykorzystaniem oprogramowania pomiarowego oraz oprogramowania do analizy wyników badań. Oba programy wykonano w środowisku LabView 8.1 (ang. Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), będącym produktem firmy National Instruments Corporation.

Wyniki pomiarów z częstotliwością 22 kHz rejestrowano używając do tego celu komputera przenośnego. Oprogramowanie do analizy wyników badań pozwala na wyznaczenie przebiegu średniego ciśnienia indykowanego z około 1400 cykli roboczych silnika badawczego, ciśnienia maksymalnego, kąta wystąpienia ciśnienia maksymalnego oraz ilości wydzielanego ciepła w komorze spalania. Wyniki obliczeń zapisywane są w plikach tekstowych.

Pomiary toksycznych składników spalin wykonywano z wykorzystaniem analizatora spalin Pierburg HGA 400. W tabeli 2.2 przedstawiono charakterystykę pomiarową zastosowanego analizatora spalin.

Tab. 2.2. Charakterystyka pomiarowa analizatora spalin HGA 400

Tab. 2.2 Measuring characteristics of the HGA 400 exhaust gas analyzer

Składnik	Rozdzielczość	Dokładność pomiaru
CO	± 0,01% obj.	< 1,2% obj. ± 0,06% obj. ≥ 1,2% obj. ± 5%
CO <sub>2</sub>	± 0,1% obj.	< 10% obj. ± 0,5% obj. ≥ 10% obj. ± 5%
HC	± 1 ppm	< 220 ppm ± 11 ppm ≥ 220 ppm ± 5%
O <sub>2</sub>	± 0,01% obj.	< 2% obj. ± 0,1% obj. ≥ 2% obj. ± 5%
NO <sub>x</sub>	± 1 ppm	< 500 ppm ± 50 ppm ≥ 500 ppm ± 10%

Współczynnik nadmiaru powietrza mierzono za pomocą cyfrowego miernika LM-1 firmy Innovate wyposażonego w szerokozakresową sondę lambda BOSCH LSU 4.2 o zakresie pomiarowym od 0,7 do 2,5 z dokładnością 0,01. Współpracujący z cyfrowym miernikiem program LogWorks2 umożliwiał ciągłą rejestrację współczynnika nadmiaru powietrza.

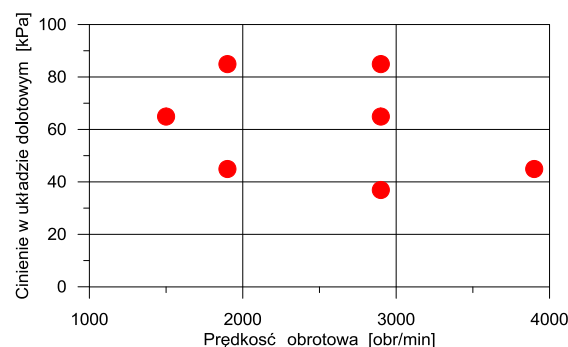
Temperaturę cieczy chłodzącej i spalin badanego silnika mierzono przy użyciu termopar typu NiCr-NiAl z dokładnością 0,1 °C.

### 3. Badania empiryczne

Badania obejmowały pracę silnika w stanie ustalonym w 7 punktach pomiarowych. Pomiary

wykonano w zakresie pracy silnika dla prędkości obrotowej  $n = 1500 - 3900$  obr/min oraz dla obciążenia silnika zawartego pomiędzy  $p_d = 37 - 85$  [kPa]. Na rysunku 3.1. przedstawiono graficznie realizowane punkty pomiarowe.

Badania zostały przeprowadzone na paliwie: benzynie oraz na benzynie z dodatkiem wodoru. Podczas zasilania silnika dwoma paliwami zmniejszano dawkę benzyny a jej brak uzupełniano paliwem gazowym w ilości zapewniającej 5, 10 i 20% udziału energetycznego dając możliwość utrzymania stałego momentu obrotowego uzyskanego przy zasilaniu samą benzyną. W celu dokładnego doregulowania momentu obrotowego w niewielkim stopniu korygowano ciśnienie w kolektorze dolotowym, zmieniając tym samym ilość ładunku w komorze spalania. Chwilę wtrysku paliwa gazowego przyjęto tak, aby początek wtrysku występował w czasie trwania suwu dolotu.



Rys. 3.1. Punkty pomiarowe  
Fig. 3.1. Measuring points

#### 3.1. Warunki badań

Badania przeprowadzono w następujących warunkach pracy silnika:

- ciśnienie atmosferyczne: 1013 hPa,
- temperatura powietrza: 25 °C,
- ciśnienie wtrysku:
  - dla benzyny 365 kPa,
  - dla H<sub>2</sub> 200 kPa,
- temperatura cieczy chłodzącej: 75 °C.

#### 3.1. Analiza wyników badań

W efekcie przeprowadzonych badań stanowiących uzyskano przebiegi czasowe ciśnienia indykowanego w komorze spalania oraz poziomy emisji składników spalin. W każdym punkcie pomiarowym rejestrowano ciśnienie w komorze spalania przez kolejne 1400 cykli roboczych silnika. Następnie dane z indykowania poddano przetwarzaniu w programie LabVIEW. Obliczenia pozwoliły wyznaczyć średnie ciśnienie indykowane, wartość maksymalnego ciśnienia w komorze spalania i kąt wystąpienia maksymalnego ciśnienia. Poniżej przedstawiono jedynie wybrane wyniki badań.

Przyjęto następujące oznaczenie punktów pomiarowych wg następującego schematu: CO<sub>2</sub> 2900/37 – stężenie CO<sub>2</sub> w spalinach dla pracy silnika przy prędkości obrotowej wału korbowego 2900 obr/min i obciążeniu silnika 37 kPa.

Rysunki 3.2 – 3.5 przedstawiają zawartość poszczególnych składników spalin emitowanych przez silnik spalinowy o zapłonie iskrowym zasilany benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru.

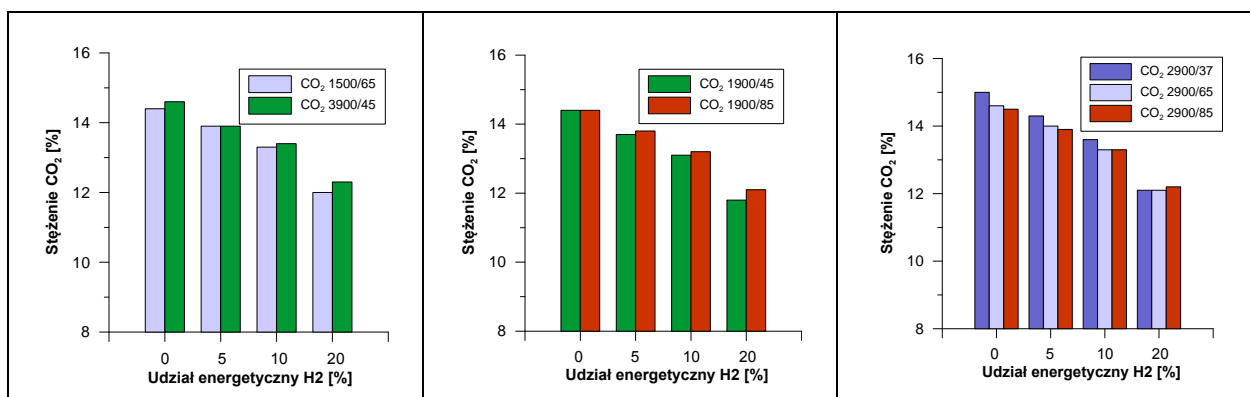
Uzyskane wyniki badań wykazują zmniejszoną emisję CO<sub>2</sub> dla każdego warunków prędkości obrotowej i obciążenia silnika wraz z zwiększaniem udziału energetycznego paliwa wodorowego oraz zmniejszoną emisję CO i HC w wybranych warunkach pracy silnika. W przypadku dwutlenku węgla uzyskano zmniejszoną emisję o ok. 20% dla punktu pracy silnika odpowiadającego średniej prędkości obrotowej i małowemu obciążeniu (CO<sub>2</sub> 2900/37). W pozostałych punktach uzyskano redukcję CO<sub>2</sub> w zakresie 15-20 %.

Emisja CO wraz ze zwiększaniem udziału paliwa wodorowego wzrastała a następnie malała. Wykazano redukcję CO o ok. 9% w porównaniu do zasilania silnika paliwem oryginalnym, dla pracy silnika przy małych i dużych prędkościach obrotowych wału korbowego silnika i średnich obciążeniach (CO 1500/65 i CO 3900/45). Dla podwyższonej prędkości obrotowej (n = 1900 obr/min) dodatek 5% paliwa wodorowego sprawia zmniejszenie

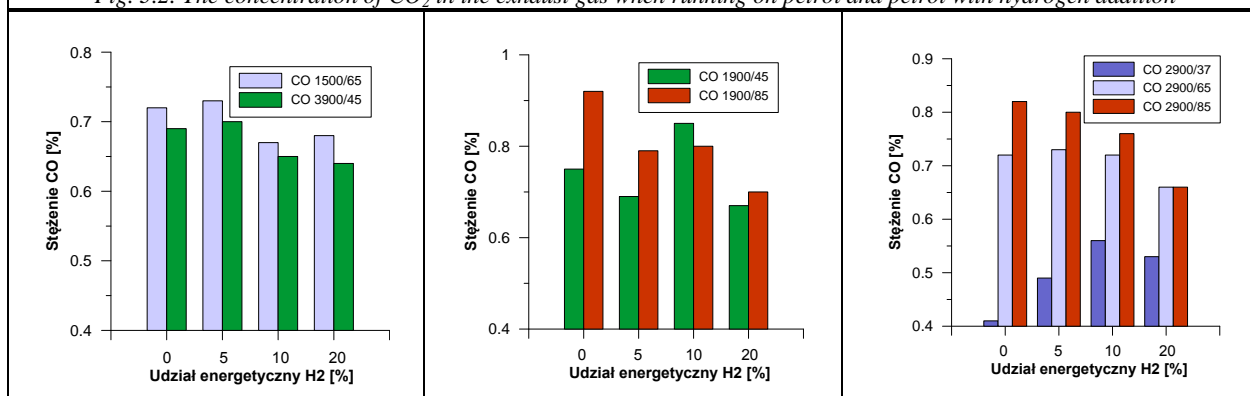
emisji CO. Natomiast dalszy wzrost udziału wodoru w mieszaninie palnej wywołuje wzrost emisji CO (10% H<sub>2</sub>) a następnie spadek (20% H<sub>2</sub>). Tendencja zmian obserwowalna jest dla średnich i dużych obciążeń silnika. Dla warunków pracy silnika odpowiadających prędkości obrotowej 2900 obr/min zwiększanie udziału paliwa wodorowego powoduje wzrost emisji CO dla małych obciążeń silnika, natomiast wzrost obciążania silnika sprawia że emisja CO maleje.

W przypadku emisji HC zwiększanie udziału wodoru w procesie spalania dla małych obciążeń silnika powoduje wzrost emisji niespalonych węglowodorów. W pozostałych punktach średniego i maksymalnego obciążenia oraz każdej prędkości obrotowej uzyskano zmniejszoną emisję HC. Największą redukcję węglowodorów wynoszącą ok. 40% w porównaniu do zasilania tradycyjnego uzyskano w punkcie pomiarowym HC 2900/85 i 20 % udziale wodoru. Spowodowane jest to zmniejszonym udziałem węgla w mieszaninie palnej.

W każdym warunkach pracy silnika odnotowano wzrost emisji NO<sub>x</sub> o 20 - 65%. Największy wzrost emisji tlenków azotu zaobserwowano dla średniej prędkości obrotowej i średniego obciążenia (NO<sub>x</sub> 1900/45) oraz podwyższonej prędkości obrotowej i małego obciążenia silnika (NO<sub>x</sub> 2900/37).

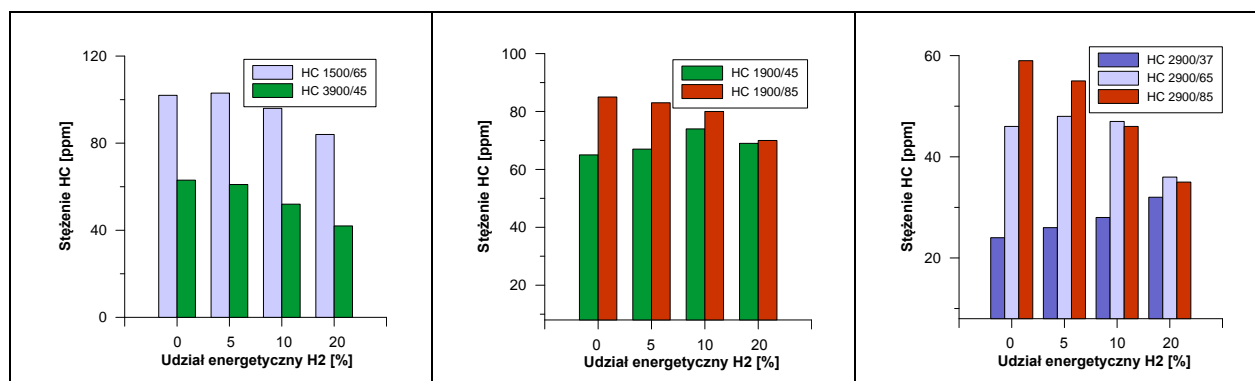


Rys. 3.2. Stężenie CO<sub>2</sub> w spalinach przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.2. The concentration of CO<sub>2</sub> in the exhaust gas when running on petrol and petrol with hydrogen addition

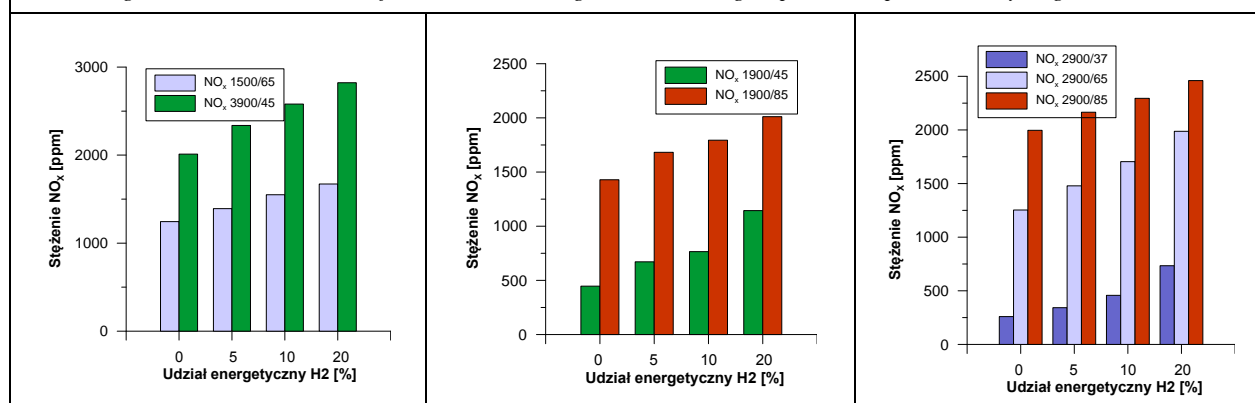


Rys. 3.3. Stężenie CO w spalinach przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.3. The concentration of CO in the exhaust gas when running on petrol and petrol with hydrogen addition





Rys. 3.4. Stężenie HC w spalinach przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.4. The concentration of HC in the exhaust gas when running on petrol and petrol with hydrogen addition



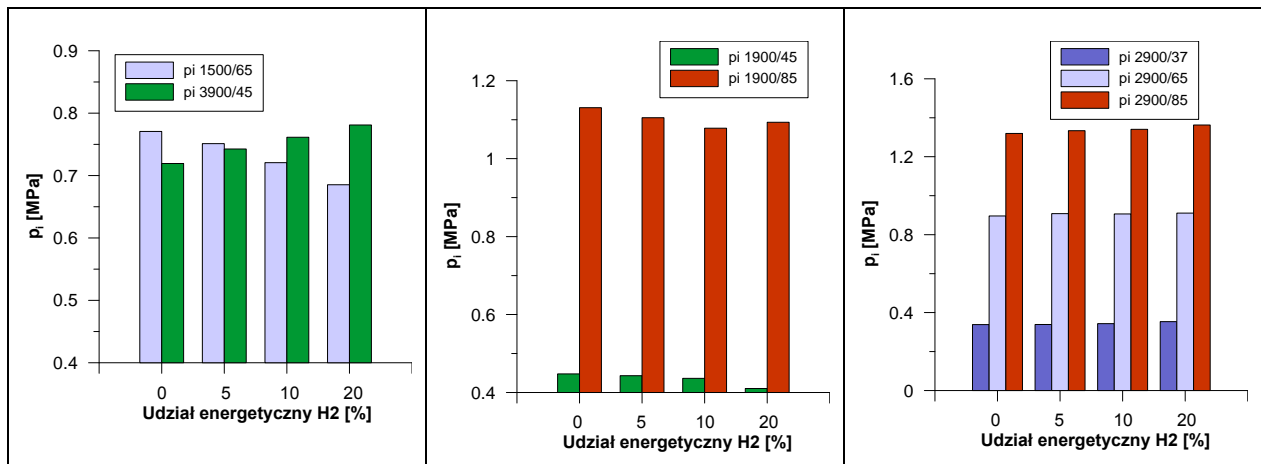
Rys. 3.5. Stężenie NO<sub>x</sub> w spalinach przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.5. The concentration of NO<sub>x</sub> in the exhaust gas when running on petrol and petrol with hydrogen addition

Na rysunkach 3.6 – 3.8 przedstawiono wyniki analizy ciśnienia spalania, w przestrzeni roboczej badanego silnika, mierzonego w drugim cylindrze. Największe różnice średniego ciśnienia indykowanego wywołanego dodatkiem paliwa wodorowego zaobserwowano dla małych i maksymalnych prędkości obrotowych wału korbowego silnika pracującego przy średnich obciążeniach ( $p_i$  1500/65 i  $p_i$  3900/45 rys. 3.6). W pozostałych punktach badawczych średnie ciśnienie indykowane utrzymywało się na zbliżonym poziomie.

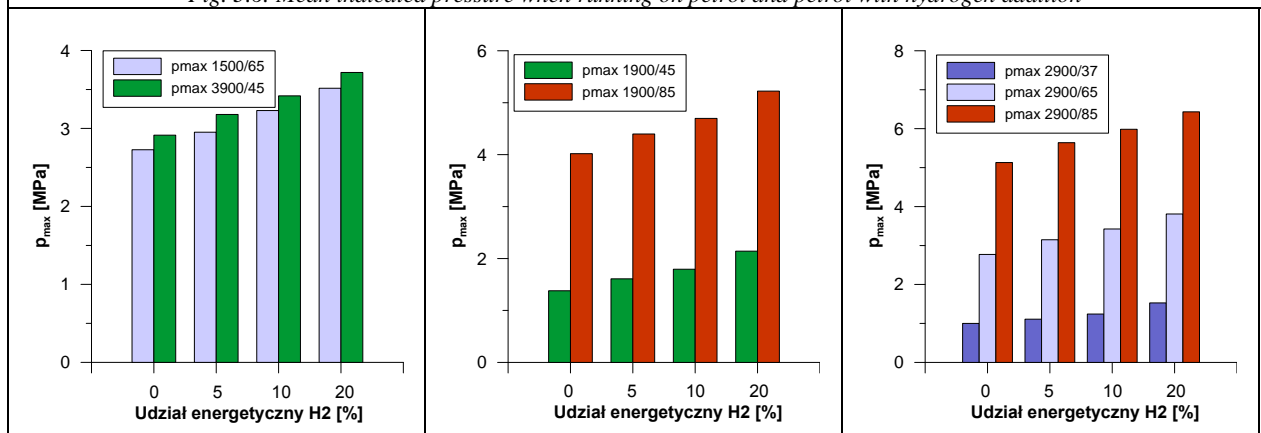
W przypadku ciśnienia maksymalnego w komorze spalania udział paliwa wodorowego powoduje zwiększenie jego wartości wykazując maksymalną różnicę ok. 35 % w porównaniu do zasilania tradycyjnego – rys. 3.7 ( $p_{max}$  1900/45). Analiza kąta wystąpienia maksymalnego ciśnienia w komorze spalania wykazuje wcześniejsze wystąpienie ci-

śnienia maksymalnego w porównaniu do wartości uzyskiwanej przy zasilaniu paliwem tradycyjnym. Różnice wynoszą nawet 10 °OWK w porównaniu do zasilania tradycyjnego.

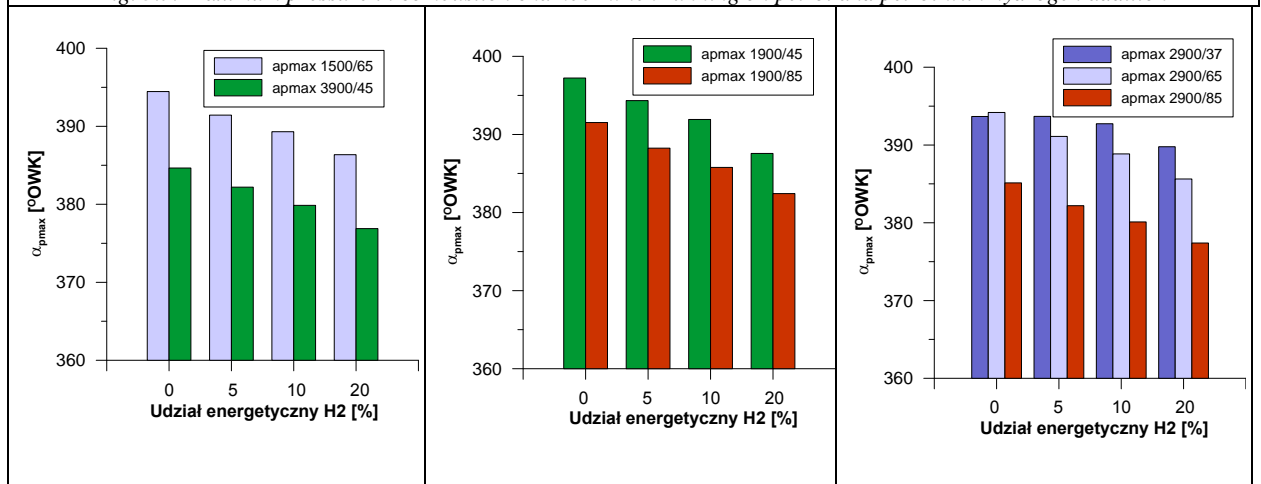
Tendencja zmian ciśnienia maksymalnego i kąta wystąpienia tego ciśnienia wraz z zwiększaniem udziału wodoru, może być przypisana do faktu, że wodór spala się znacznie gwałtowniej ponieważ jego masa jest mniejsza. Spalanie wodoru zachodzi z większą prędkością i wywołuje więcej zderzeń na poziomie molekularnym niż cięższe molekuly węglowodorowe. Sprawia to że silnik charakteryzuje się głośniejszą pracą, a praca przy dużych prędkościach obrotowych, obciążeniach i udziale energetycznym wodoru prowadzi do wystąpienia spalania detonacyjnego.



Rys. 3.6. Średnie ciśnienie indykowane przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.6. Mean indicated pressure when running on petrol and petrol with hydrogen addition



Rys. 3.7. Maksymalne ciśnienie w komorze spalania przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.7. Maximum pressure in combustion chamber when running on petrol and petrol with hydrogen addition



Rys. 3.8. Kąt wystąpienia maksymalnego ciśnienia w komorze spalania przy zasilaniu silnika benzyną oraz benzyną z dodatkiem wodoru  
 Fig. 3.8. Angel of maximum pressure occurs in combustion chamber when running on diesel fuel and diesel fuel with hydrogen addition

## 4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski i spostrzeżenia:

- Zastąpienie paliwa oryginalnego, wodorem, zmienia przebieg procesu spalania w silniku o zapłonie iskrowym.
- Udział energetyczny paliwa wodorowego w mieszaniu palnej silnika wpływa na emisję składników spalin: zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> (do 20%) w każdych warunkach pracy silnika, zmniejszenie emisji niespalonych węglowodorów (do 20%) dla maksymalnych obciążeń silnika oraz wzrost tlen-

ków azotu w każdych warunkach pracy silnika. Największa różnica obserwowalna jest w przypadku emisji NO<sub>x</sub> – do 65% w porównaniu do zasilania paliwem oryginalnym.

- Dodatek paliwa wodorowego wpływa na wartość ciśnienia maksymalnego w komorze spalania oraz przyspiesza punkt wystąpienia ciśnienia maksymalnego.
- W silniku o zapłonie iskrowym 20% udział paliwa wodorowego dla maksymalnych obciążeń silnika prowadzi do wystąpienia spalania stukowego.

## Nomenclature/Skróty i oznaczenia

H<sub>2</sub> Hydrogen / *wodór*,

OWK Crank angle / *kąt obrotu wału korbowego*,

GMP Top dead center / *górne martwe położenie tłoka*,

DMP Bottom dead center / *dolne martwe położenie tłoka*.

## Bibliography/Literatura

- [1] Ch. Ji, S. Wang: Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions, international journal of hydrogen energy 34 (2009) 7823 –7834.
- [2] V. J. Subramanian, M. Mallikarjuna: “Improvement of combustion stability and thermal efficiency of a hydrogen fuelled SI engine at low loads by throttling”. Internal Combustion Engines Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, 2002
- [3] E. Kahramana, S. Cihangir Ozcanlib, B. Ozerdemb: An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. International journal of hydrogen energy, 2007.
- [4] Ghazi A. Karim: Hydrogen as a spark ignition engine fuel. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, University of Calgary. International journal of hydrogen energy, 2003.
- [5] R. Hari Ganeshb, V. Subramaniana, V. Balasubramanianb, J.M. Mallikarjunaa, A. Ramesha, R.P. Sharmaa: Hydrogen fuelled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: An experimental study. Renewable energy, 2008.
- [6] Materiały internetowe firmy Mazda, BMW, Mercedes, Rolls-Royce.

Mr Grzegorz Barański, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

*mgr inż. Grzegorz Barański – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.*



Mr 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.*



Mr Michał Gęca, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

*mgr inż. Michał Gęca – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.*



Mr Michał Biały, MEng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

*mgr inż. Michał Biały – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej*

