

Stanisław KRUCZYŃSKI
Marcin ŚLĘZAK
Wojciech GIS
Piotr ORLIŃSKI

EVALUATION OF THE IMPACT OF COMBUSTION HYDROGEN ADDITION ON OPERATING PROPERTIES OF SELF-IGNITION ENGINE

OCENA WPŁYWU SPALANIA DODATKU WODORU NA WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNE SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM*

The work presents the results of effect of the addition of hydrogen in an amount up to 9% of mass of diesel oil into the intake system of Perkins1104C-E44TA engine. The impact of hydrogen addition on process heat release in the combustion chamber and the concentration of CO, THC, NOX and PM in the exhaust at predetermined engine operating conditions. It was summarised that the analysis of the results does not justify the use of hydrogen as a fuel additive in self-ignition engines.

Keywords: IC engines, hydrogen, diesel, heat emission.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku wodoru w ilości do 9% masy oleju napędowego do układu dolotowego silnika Perkins1104C-E44T. Oceniono wpływ dodatku na proces wydzielania ciepła w komorze spalania i stężenia CO, THC, NOX i PM w spalinach w ustalonych warunkach pracy silnika. W podsumowaniu stwierdzono iż analiza wyników badań nie uzasadnia stosowania wodoru jako dodatku do paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, wodór, olej napędowy, wydzielanie się ciepła.

1. Introduction

Fuelling hydrogen internal combustion engines (HYICE) with hydrogen is presently the subject matter of numerous research & development works. According to paper [5] it is a temporary solution before projected fuel cells are implemented, which aims to prepare for and put into operation hydrogen storage and distribution infrastructure. Mainly spark-ignition engines are adapted for hydrogen fuelling but it is also possible to adjust self-ignition engines for hydrogen fuelling.

Hydrogen supply IC engine fuel should be considered depending on the type of diesel cycle:

1. The use of hydrogen alone or as an addition to gasoline or LPG and methane in spark-ignition engines;
2. The use of hydrogen as an addition to diesel oil in self-ignition engines.

1.1. Hydrogen in spark-ignition engines.

An analysis of the impact of hydrogen used as basic fuel [3, 4] proved that:

- it is possible to achieve efficiency at a level similar or higher than in case of a conventional engine fuelled with gasoline with limited engine power;
- high emission of nitrogen oxides in exhaust (fuel contains no carbon compounds producing toxic substances).

An analysis of impact of use of hydrogen as an addition to hydrocarbon fuel [1, 8, 13, 15] proved that:

- it is possible to achieve efficiency similar to that of a conventional engine fuelled with gasoline with slightly limited engine power,
- CO and HC emissions decrease, whereas the emission of NO_x increases and thermal efficiency grows when poor mixtures are used.

Hydrogen IC engines are based on the technology of spark ignition piston engines and after some modifications may be used fuelled both with conventional fuels as well as with hydrogen [5].

In the papers [3, 4], authors refer to pre-ignition hydrogen as one of the main problems in applying hydrogen in piston engines with spark ignition.

According to the authors the basic causes for pre-ignition include:

- low energy of hydrogen ignition (0,02 mJ),
- wide range of combustion limits 4%–75% v/v,
- small critical distance for flame propagation.

As regards the effects of pre-ignition the authors point to:

- lower efficiency of engine,
- engine roughness work,
- possibility that flame moves to the inlet duct.

Because small gasoline engines operate with a slightly richer mixture and do not have a catalytic reactor, their fuel consumption and emissions are very high. When gasoline engines are fuelled with hydrogen only, emission of NO_x increases and the flame often retreats to the inlet system [8].

(*) Tekst artykułu w polskiej wersji językowej dostępny w elektronicznym wydaniu kwartalnika na stronie www.ein.org.pl

Paper [1] presents results of studies of a 6-cylinder, spark-ignition engine type MAN E2876 LE302 intended for a power generator and as a standard fuelled with natural gas and hydrogen alternatively. The studies were carried out at a fixed rotational speed of 1500 rotations per minute and variable engine load. Those conditions correspond to the work of the engine in a power-generator. Parameters of the engine that had to be adjusted to hydrogen fuelling included in particular the angle of ignition advance and air fuel ratio.

Compared to natural gas fuelling, when fuelling engine with hydrogen the concentration of carbon oxide and hydrocarbons was minor and resulted mainly from the combustion of lubricating oil. However, a small increase concentration of nitrogen oxides was recorded only in conditions of load close to maximum. In both cases general engine efficiency is high and when fuelled with natural gas its maximum value is approx. 42%, whereas when fuelled with hydrogen it came to c.a. 37%.

In paper [15] the study addressed the impact of hydrogen addition to gasoline on the value of average effective pressure, engine work efficiency, efficiency filling of cylinders and emission characteristics. The results of the studies proved that fuel consumption and average effective pressure had been decreased through of hydrogen addition. The results of studies also showed that thermal efficiency of the engine was greater than in case of gasoline combustion. Furthermore, HC and CO emissions dropped owing to the use of hydrogen addition.

The results of studies presented in the paper [13] regarding impact of combusting hydrogen addition to gasoline compared to the combustion of gasoline in spark-ignition engines lead to the following conclusions:

- the engine was found working stably on poor mixtures,
- with the hydrogen addition the engine power increased,
- the unit consumption of fuel decreased and the level of HC and CO emissions lowered,
- higher level of NO_x emission was observed, especially when combusting mixtures within the range of $\lambda = 1 - 1,4$,
- with quality adjustment of the engine power, the emission of NO_x can be lowered.

Paper [10] addresses the possibility of combusting poor mixtures by adding hydrogen to a spark-ignition engine fuelled with methane. The following hydrogen additions of 10%, 30% and 50% of methane's volume were used. The results of the study show that the limit of combustion of poor mixtures may be moved towards poor mixtures by adding hydrogen, in particular in greater engine load. The impact of engine's rotational speed on the said limits is much lower. The angle of ignition advance also has impact on the limits of combustion of poor mixtures but both excessive delays as well as ignition lead is not recommended.

Paper [12] presents the results of studies conducted in ENEA laboratories, which aimed to identify potential possibilities of using mixtures of natural gas and hydrogen (known as HCNG or Hythane) in the used motor vehicles. The Iveco Daily CNG delivery van was tested, adapted to spark ignition and stoichiometric fuelling of engine with methane in ECE15 cycle, comparing levels of emission when fuelling the engine with methane with the results achieved when fuelling the engine with hydrogen and methane mixtures when combusting mixtures both stoichiometric and poor.

It was found that optimal conditions of HCNG combustion can be achieved by applying – depending on the conditions of engine's operation – both the combustion of poor mixtures in order to reduce fuel consumption and the combustion of stoichiometric mixtures in order to reduce emission of harmful substances. Effective combustion of poor mixtures requires – however – optimisation of compression ratio and charging of the engine, the angle of ignition advance and the share of hydrogen in the mixture mainly because of decreased engine

power due to lower content of energy in the volume of HCNG mixture (11% in case of a mixture with 15% of hydrogen in its volume).

Summarising, the analysis of results of studies justifies the use of hydrogen as a fuel addition in spark-ignition engines provided that significant changes in the engine construction are introduced, mainly by using hydrogen injection to the combustion chamber while at the same time combusting poor mixtures at low engine load and stoichiometric mixtures with full engine load. It is necessary to introduce a system eliminating NO_x in combustion gases, e.g. SCR system.

1.2. Hydrogen in self-ignition engines.

Hydrogen in a self-ignition engine may be used only as an addition to diesel oil or biodiesel [8] as it has poor self-ignition properties and as such cannot be used alone in this type of engine. Studies conducted at the Poznań University of Technology in the Institute of IC Engines and Transport [2] show that hydrogen addition of 5% ÷ 7% m/m to the combustion chamber has no greater impact on engine performance but it does result in increased CO and PM emissions.

According to a study conducted in Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) stated that smokiness decreases with the additional deployment of hydrogen. Other indicators of the exhaust gas using the hydrogen in case of the rig tests are worse [7]. Similar opinions contained in [6, 11, 14].

Because of its properties hydrogen is better predisposed to fuelling of spark-ignition engines than self-ignition engines. However, because of high calorific value, the possibility of limiting the emission of toxic substances, attempts were made to fuelling of self-ignition engines with hydrogen [17]. Those studies focused on hydrogen added to fuel because hydrogen has poor self-ignition properties and as such cannot in this type of engine be used as the only fuel. Table 1 presents a comparison of chosen properties of diesel oil and hydrogen.

Table 1. Comparison of properties of diesel oil and hydrogen [9]

| Property | Unit | ON | Hydrogen |
|----------------------------------|-------------------|---------|-----------------|
| Density | kg/m ³ | 840 | 0,0824 ÷ 0,0838 |
| Lower calorific value | MJ/kg | 42,49 | 119,81 |
| Flame ratio | m/s | 0,3 | 1,85 ÷ 1,9 |
| Cetane number | - | 45 ÷ 55 | - |
| Self-ignition temperature in air | °C | 280 | 585 |
| Carbonisation residue | - | 0,1 | 0,0 |

The impact of hydrogen on the combustion process in self-ignition engines is similar as the impact described earlier on spark-ignition engines (low calorific value vs volume, decrease in the emission of toxic carbon compounds, high flame speed).

Current studies [9] show that depending on the quantity of the added hydrogen thermal efficiency of the engine drops, increases the delay of self-ignition and promptness in increasing pressure in the cylinder (self-ignition of the mixture occurs later while the combustion of the mixture is faster). Increased temperature leads to increase in the concentration of nitrogen oxides, but noticeable is considerable drop in the emission of carbon compounds.

The subject of the paper [2] comprised an analysis of the possibility of improving environmental friendly indicators in self-ignition engine AVL 5804 bi-fuelled with diesel oil with hydrogen addition). Bi-fuelling provided hydrogen to the inlet channel and a self-ignition dose of the diesel oil was used, each time defined for a particular load and rotational speed as a source of ignition of the hydrogen air mixture.

Fuelling the engine with diesel oil with hydrogen addition delivered to the inlet duct caused an apparent change in thermo-dynamic and ecological indicators, i.e.:

- maximum reduction of the speed in pressure growth $dp/d\alpha$ by approx. 5% and the value of the maximum pressure in the combustion chamber by approx. 6%,
- increase in the concentration of carbon oxide by approx. 150%,
- decrease in the concentration of nitrogen oxides by approx. 25%,
- decrease in the concentration of non-combusted hydrocarbons by approx. 300%,
- increase in the concentration of particles by approx. 150%.

The aim of this work was to evaluate – through tests – the impact of hydrogen addition in diesel oil on the process of heat release and concentration of harmful substances in self-ignition engines.

2. Test stand

Tests were carried out on Perkins 1104C-E44T engine with eddy current brakes Schenck WM 400 controlled with controller Schenck X-ACT. The apparatus for measuring indicated pressure and analysing thermal emission consisted of AVL INDISMART system for engine indication and a position sensor for crankshaft AVL 365C01. Data had been sent to a PC in real time. With IndiCom software it was possible to view incoming data (also in real time), to record a cycle of 50 measurements and to save the files together with parameters of the tested engine.

Thereafter, the resulting data had been subject to processing with the use of AVL Concerto. The said programme averaged changes of pressure in the cylinder and calculated the rate heat release without taking into account heat loss to cylinder walls (net heat emission). Moreover, during the tests CO, THC and NO_x concentration were recorded with the use of AVL CEB2 combustion gases analyser, equipped with PROVIT 5600 control panel. Measurements of the concentration PM had been estimated with AVL 415. The engine was fuelled with diesel oil (PKN Orlen) and hydrogen addition under pressure 150 bar in cylinder.

Diesel oil consumption was measured with a volume method, whereas the quantity of hydrogen after the reduction of its pressure was gauged with a specially marked rotameter. Hydrogen was delivered before the turbine to the engine's inlet system. Technical data of the engine are presented in table 2 and the test stand overview is shown (Fig. 1).

Table 2. Technical parameters of Perkins 1104C-E44T engine

| Parameter | Unit | Value |
|------------------------------|-----------------|-------------------|
| Effective power | kW | 74,5 |
| Compression ratio | [-] | 18,2 |
| Cylinder diameter | mm | 105 |
| Piston stroke | mm | 127 |
| Engine displacement | dm ³ | 4,4 |
| Number and cylinders, system | [-] | 4, stroke |
| Fuelling system | [-] | Direct injection |
| Recharge | [-] | Yes; turbocharger |

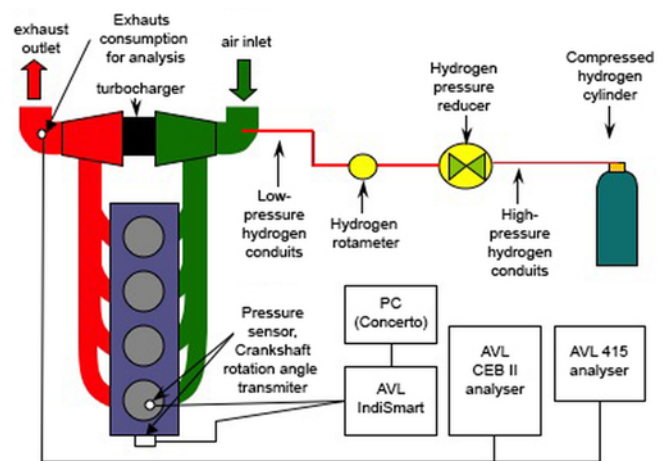


Fig. 1. Diagram of bench with diagram of engine Perkins 1104C-E44TA

3. Results of studies

The studies were conducted with a fixed rotational engine speed of $n = 1100$ rotations per minute and diesel oil in a quantity equal to torque developed by the engine at the level of $M = 165$ Nm. Hydrogen was equal to 8.9% of the mass of diesel oil by decreasing the quantity of diesel oil gradually together with the increase of hydrogen addition in order to achieve torque of approx. 165 Nm. The results of pressure measurement in the combustion chamber and the results of calculations of rate of heat release in an engine fuelled with diesel oil only and diesel oil and a hydrogen addition of 5.5% and 8.9% are presented (Fig. 2, Fig. 3) respectively.

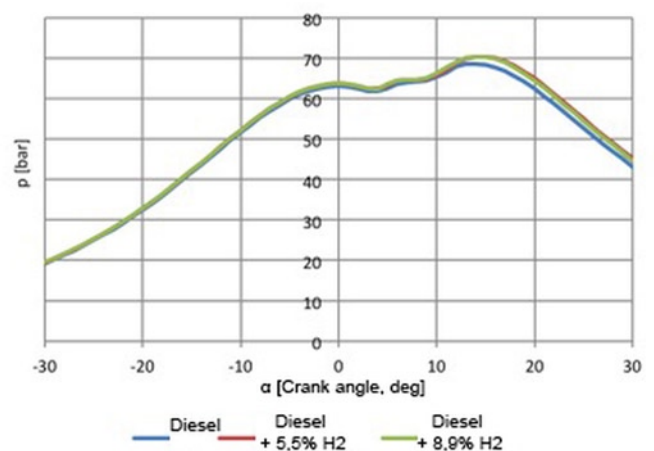


Fig. 2. An indicator diagram $p = f(\alpha)$ with the engine in the conditions of $n = 1100$ r / min, $M = 164$ Nm powered diesel and diesel with the addition of 5.5% H₂ and 8.9% H₂

Then again, the results of measurements of CO concentration using method NDIR, THC with FID method and NO_x with CL method and PM mass concentration with the filter method in an engine fuelled with diesel oil and diesel oil with hydrogen addition are presented below (Fig. 4, Fig. 5).

4. Analysis of results of tests and conclusions

Hydrogen addition did not influence definitely essential differences in the combustion process. A slight change in the character of pressure curves in the combustion chamber was noted (increase of maximum combustion pressure by approx. 2%). The curves of rate of heat release show a classic kinetic and diffusion phase depending on fuel type. The kinetic phase remained almost identical, whereas

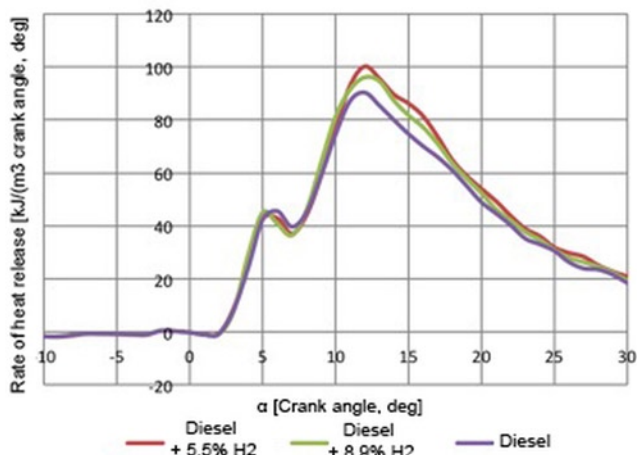


Fig 3. The rate of heat release as a function of crank angle with engine operating conditions of $n = 1100 \text{ r/min}$, $M = 164 \text{ Nm}$ powered diesel and diesel with the addition of 5.5% H_2 and 8.9% H_2

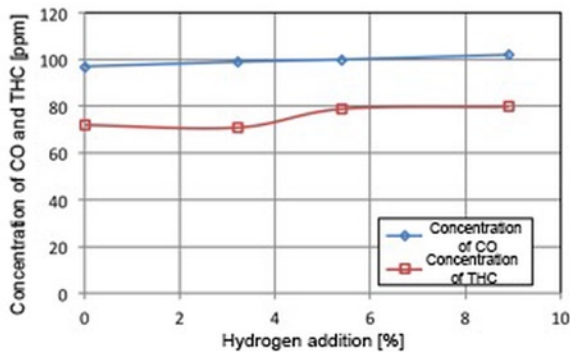


Fig 4. The results of the measurement of concentrations of CO and THC depending on the hydrogen addition with the engine supplied with diesel oil with additions of hydrogen

during the diffusion phase of rate of heat release increased by approx. 10%, most likely due to hydrogen combustion. Key parameters of the combustion process (self-ignition knock, character of respective combustion phases) remained unchanged after hydrogen addition was applied.

References

1. Brzeżański M, Mareczek M, Marek W, Papuga T. Określenie parametrów ekologicznych stacjonarnego silnika spalinowego zasilanego różnymi paliwami. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 2014; 1(97): 101-108.
2. Daszkiewicz P. Badania możliwości poprawy wskaźników ekologicznych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru. Praca doktorska 2014; 1-123.
3. Deczyński J, Żółtowski B. Wodór jako paliwo alternatywne do zasilania silników ze spalaniem wewnętrznym. Studies & Proceedings of Polish Association 2014; (69): 19-31.
4. Doppler M. Rozwój i przyszłość napędu hybrydowo-wodorowego dla samochodów. Akademia Górniczo-Hutnicza 2005; 1-7.
5. HYICE Result in Brief 2015; 1-4.
6. Jarunghammachote S, Chuepeng S, Chaisermatwan P. Effect of hydrogen addition on diesel engine operation and NOX emission: A thermodynamic study. Am. J. Applied Sci. 2012; (9): 1472-1478.
7. Keršys A, Kilisinskas D, Pukalaskas S, Vilkauskas A, Keršys R, Makaras R. Investigation of the Influence of Hydrogen Used in Internal Combustion Engines on Exhaust Emission. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2013; 15 (4): 384-389.
8. Kosar M, Ozdalyan B, Celik M B. The Usage of Hydrogen for Improving Emissions and Fuel Consumption in a Small Gasoline Engine. Journal of Thermal Science and Technology 2011; 31(2): 101-108.
9. Lejda K. Wodór w aplikacjach do środków napędu w transporcie drogowym, Wydawnictwo KORAW 2013; 1-169.
10. Ma F, Wang Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark ignition engine. International Journal of Hydrogen Energy 2008; (33): 1416-1424, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.040>.
11. Miyamoto T, Hasegawa H, Mikami M, Kojima N, Kabashima H. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust

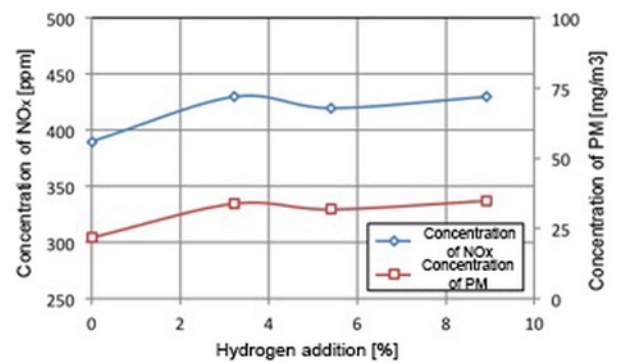


Fig 5. The results of measurements of concentrations of NO_x and PM depending on the compactness of hydrogen addition measured when the engine supplied with diesel oil with additions of hydrogen.

The results of measurements of concentration of toxic substances did not prove theories regarding the improvement of those indicators. The analysis of the impact of hydrogen addition in the inlet system of a self-ignition engine proved slight increase in the levels of all analysed constituents of exhaust (i.e. carbon oxide, hydrocarbons, nitrogen oxides and PM). Increase in CO and THC levels may stem from high reactivity of hydrogen inhibiting the oxidation of hydrocarbons as a result of which THC and PM levels increase. The increase in NO_x levels may result from increased temperature in the combustion chamber due to hydrogen addition.

The basic importance to sensible operation of technical object is the knowledge of its failures. Failure, understood as a limiting state of object can be dangerous for human life or/and does financial losses [16]. The ability of object to fulfil required function is called dependability. It covers some features of object as follows: availability, reliability, maintainability, safety, service and durability. The durability is an important tie in dependability chain [16].

Durability prediction of engine is done for example of piston rings for hydrogen fuelling engine [16]. According to [16] for hydrogen fuelling engine it can be expected faster wearing of piston rings than for petrol. The importance of fuel effect on engine durability belongs to calorific value and elementary composition of fuel first of all [16], in diesel engines too.

Summarising, the analysis of results of the studies does not justify the use of hydrogen as a fuel addition in self-ignition engines.

- emission characteristics of diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; (36): 13138-13149, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.144>.
12. Ortezi F, Chiesa M, Conigli F. Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light Duty Vehicles. *HYSYDAYS - 2nd World Energy Systems* 2007; 1-11.
 13. Rusu E, Pana C, Negurescu N. Experimental Study of a Spark Ignition Engine Fueled with Gasoline and Hydrogen in Addition. *U.P.B. Sci. Bull., Series D* 2013; 75(4): 127-136.
 14. Saravanan N, Nagarajan G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source. *Applied Energy* 2010; (87): 2218-2229, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.014>.
 15. Shivaprasad K V, Raviteja S, Chitragar P, Kumar G N: Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine. *Procedia Technology* 2014; (14): 141-148.
 16. Sroka Z. Durability of engine components due to alternative fuels. *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2007; (4): 9-15.
 17. Surygała J. Wodór jako paliwo, *Wydawnictwa Naukowo-Techniczne* 2008; 1-177.

Stanisław KRUCZYŃSKI

Marcin ŚLĘZAK

Wojciech GIS

Motor Transport Institute

ul. Jagiellońska 80, 03-301 Warsaw, Poland

Piotr ORLIŃSKI

Institute of Vehicles of the Warsaw University of Technology

ul. Narbutta 84, 02-524 Warsaw, Poland

E-mails: stanislaw.kruczynski@its.waw.pl, marcin.slezak@its.waw.pl,

wojciech.gis@its.waw.pl, p.orlinski@simr.pw.edu.pl

Stanisław KRUCZYŃSKI
Marcin ŚLĘZAK
Wojciech GIS
Piotr ORLIŃSKI

EVALUATION OF THE IMPACT OF COMBUSTION HYDROGEN ADDITION ON OPERATING PROPERTIES OF SELF-IGNITION ENGINE

OCENA WPŁYWU SPALANIA DODATKU WODORU NA WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNE SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

The work presents the results of effect of the addition of hydrogen in an amount up to 9% of mass of diesel oil into the intake system of Perkins1104C-E44TA engine. The impact of hydrogen addition on process heat release in the combustion chamber and the concentration of CO, THC, NO_x and PM in the exhaust at predetermined engine operating conditions. It was summarised that the analysis of the results does not justify the use of hydrogen as a fuel additive in self-ignition engines.

Keywords: IC engines, hydrogen, diesel, heat emission.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu dodatku wodoru w ilości do 9% masy oleju napędowego do układu dolotowego silnika Perkins1104C-E44T. Oceniono wpływ dodatku na proces wydzielania ciepła w komorze spalania i stężenia CO, THC, NO_x i PM w spalinach w ustalonych warunkach pracy silnika. W podsumowaniu stwierdzono iż analiza wyników badań nie uzasadnia stosowania wodoru jako dodatku do paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, wodór, olej napędowy, wydzielanie się ciepła.

1. Wstęp

Zasilanie silników spalinowych wewnętrznego spalania wodorem (HYICE) jest obecnie przedmiotem wielu prac badawczo-rozwojowych. W pracy [5] stwierdzono iż jest to jednak rozwiązanie tymczasowe przed wprowadzeniem perspektywicznych ogniw paliwowych i ma na celu wstępne przygotowanie i wdrożenie infrastruktury przechowywania i rozprowadzania wodoru. Do zasilania wodorem przystosowuje się głównie silniki o zapłonie iskrowym, ale również możliwe jest przystosowanie silnika o zapłonie samoczynnym.

Zasilanie silników spalinowych wodorem należy rozpatrywać w zależności od rodzaju obiegu silnika o zapłonie samoczynnym:

1. Zastosowanie wyłącznie wodoru jako paliwa lub dodatku do benzyny lub LPG oraz metanu w silnikach o zapłonie iskrowym.
2. Zastosowanie wodoru jako dodatku do oleju napędowego w silnikach o zapłonie samoczynnym.

1.1. Wodór w silnikach o zapłonie iskrowym.

Analiza wpływu zastosowania wyłącznie wodoru jako paliwa [3, 4] podstawowego wykazała, że:

- możliwość uzyskania sprawności na poziomie podobnym lub wyższym niż konwencjonalnego silnika zasilanego benzyną przy ograniczeniu mocy silnika,
- wysoką emisję w spalinach tylko tlenków azotu (paliwo nie zawiera w składzie żadnych związków węgla tworzących związki toksyczne).

Analiza wpływu zastosowania wodoru jako dodatku do paliwa węglowodorowego [1, 8, 13, 15] wykazała:

- możliwość uzyskania sprawności na poziomie silnika konwencjonalnego zasilanego benzyną przy niewielkim ograniczeniu mocy silnika,
- zmniejszenie emisji CO i HC i wzrost emisji NO_x, oraz zwiększenie sprawności cieplnej szczególnie przy pracy na mieszance ubogiej.

Silniki wodorowe wewnętrznego spalania oparte są na technologii silników tłokowych o zapłonie iskrowym i po pewnych modyfikacjach, mogą umożliwić ich pracę przy zasilaniu zarówno konwencjonalnymi paliwami kopalnymi, jak i wodorem [5].

W pracach [3, 4] autorzy jako jeden głównych problemów zastosowania wodoru w silnikach tłokowych o zapłonie iskrowym wymieniają przedwczesny zapłon wodoru. Podstawowe przyczyny występowania przedwczesnego zapłonu zdaniem autorów są następujące:

- bardzo niska energia zapłonu wodoru (0,02 mJ),
- szeroki zakres granic palności 4%–75% v/v,
- mała odległość krytyczna propagacji płomienia.

Natomiast jako skutki występowania przedwczesnego zapłonu wymieniają:

- zmniejszenie sprawności pracy silnika,
- nierównomierną pracę silnika,
- możliwość dostania się płomienia do przewodu dolotowego.

Ponieważ małe silniki benzynowe pracują przy nieco bogatszej mieszance i nie posiadają reaktora katalitycznego, ich wartości zużycia paliwa i emisje są bardzo duże. Gdy silniki benzynowe są zasilane samym wodorem, zwiększa się emisja NO_x i często występuje cofanie się płomienia do układu dolotowego [8].

W pracy [1] zaprezentowano wyniki badań 6-cylindrowego, doładowanego silnika o zapłonie iskrowym typu MAN E2876 LE302 przeznaczonego do napędu generatora prądu i standardowo zasilanego gazem ziemnym oraz zamiennie wodorem. Badania zrealizowano przy stałej prędkości obrotowej silnika 1500 obr/min i zmienianym obciążeniu silnika. Warunki te odpowiadają pracy silnika w agregacie prądotwórczym. Spośród parametrów regulacyjnych badanego silnika, które musiały zostać dopasowywane do zasilania wodorem należały przede wszystkim: kąt wyprzedzenia zapłonu oraz współczynnik nadmiaru powietrza

W porównaniu do zasilania gazem ziemnym, podczas zasilania silnika wodorem stężenie tlenu węgla i węglowodorów było pomijalnie małe i wynikało głównie ze spalania oleju smarującego silnik. Zanotowano natomiast niewielki wzrost stężenia tlenków azotu jedynie przy pracy z obciążeniem bliskim maksymalnego. W obu rozpatrywanych przypadkach sprawność ogólna silnika jest duża i podczas zasilania gazem ziemnym jej maksymalna wartość wynosi ok. 42%, a podczas zasilania wodorem zmniejszyła się do około 37%.

W pracy [15] badano wpływ dodatku wodoru do benzyny na wartość średniego ciśnienia efektywnego, sprawność pracy silnika, sprawność napełnienia cylindrów i charakterystyki emisji. Wyniki badań wykazały, że zużycie paliwa oraz średnie ciśnienie efektywne zostało zmniejszone poprzez dodatek wodoru. Wyniki doświadczeń wykazały także, że sprawność cieplna pracy silnika była większa niż w przypadku spalania benzyny. Ponadto emisje HC i CO uległy zmniejszeniu po zastosowaniu dodatku wodoru.

Wyniki badań przedstawione w pracy [13] dotyczące wpływu spalania dodatku wodoru do benzyny w stosunku do spalania benzyny w silniku ZI prowadzą do następujących wniosków:

- stwierdzono stabilną pracę silnika na mieszankach ubogich,
- zaobserwowano zwiększenie mocy silnika poprzez zastosowanie dodatku wodoru,
- stwierdzono obniżenie jednostkowego zużycia paliwa i zmniejszone poziomu emisji HC i CO,
- zaobserwowano wyższy poziom emisji NO_x szczególnie przy spalaniu mieszanek w zakresie $\lambda = 1 - 1,4$,
- stosując regulację jakościową mocy silnika można zmniejszyć poziom emisji NO_x.

W pracy [10] badano możliwości spalania mieszanek ubogich poprzez dodatek wodoru do silnika ZI zasilanego metanem. Zastosowano dodatki wodoru w ilości 10%, 30% i 50% objętości metanu. Wyniki badań pokazują, że granica spalania mieszanek ubogich może być przesunięta w kierunku mieszanek ubogich poprzez dodanie wodoru szczególnie przy większych obciążeniach silnika. Wpływ prędkości obrotowej silnika na ww. granice jest zdecydowanie mniejszy. Kąt wyprzedzenia zapłonu wpływa również na granice spalania mieszanek ubogich lecz zarówno zbyt duże opóźnienie jak i wyprzedzenie zapłonu nie jest wskazane.

W pracy [12] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych prowadzonych w laboratoriach ENEA, którego celem była identyfikacja potencjalnych możliwości wykorzystania mieszanek gazu ziemnego i wodoru (określanych jako HCNG lub Hytan) w eksploatowanych pojazdach samochodowych. Testowano samochód dostawczy Iveco Daily CNG, przystosowany do zapłonu iskrowego i stechiometrycznego zasilania silnika metanem w cyklu ECE15, porównując poziomy emisji przy zasilaniu silnika metanem z wynikami uzyskanymi przy zasilaniu silnika mieszankami wodoru i metanu przy spalaniu mieszanek zarówno stechiometrycznych, jak i ubogich.

Stwierdzono iż optymalne warunki spalania HCNG można uzyskać stosując w zależności od warunków pracy silnika zarówno spalanie mieszanek ubogich w celu zmniejszenia zużycia paliwa jak i spalanie mieszanek stechiometrycznych w celu zmniejszenia emisji substancji szkodliwych. Efektywne spalanie mieszanek ubogich wymaga jednak optymalizacji stopnia sprężania i doładowania silnika, kąta wyprzedzenia zapłonu i udziału wodoru w mieszaninie głównie ze względu na zmniejszenie mocy silnika z powodu niższej zawartości energii w objętości mieszanki HCNG (11% w przypadku mieszanki zawierającej objętościowo 15% wodoru).

W podsumowaniu można stwierdzić iż analiza wyników badań uzasadnia stosowanie wodoru jako dodatku do paliwa w silnikach o zapłonie iskrowym przy istotnych zmianach w budowie silnika, polegających głównie na zastosowaniu wtrysku wodoru do komory spalania przy jednoczesnym spalaniu mieszanek ubogich przy niskich obciążeniach silnika i mieszanek stechiometrycznych przy pełnym obciążeniu silnika. Koniecznym zabiegiem będzie wprowadzenie systemu oczyszczania spalin z NO_x np. systemu SCR.

1.2. Wodór w silnikach o zapłonie samoczynnym.

Wodór w silniku ZS może być zastosowany jedynie jako dodatek do oleju napędowego lub biodiesla [8], gdyż ma słabe właściwości samozapłonowe i jako taki nie może w tym typie silnika występować jako paliwo samoistne. Badania przeprowadzone na Politechnice Poznańskiej w Instytucie Silników Spalinowych i Transportu [2] wskazują, iż dodatek wodoru rzędu 5% ÷ 7% m/m do komory spalania nie ma większego wpływu na osiągi silnika jednak odbywa się to kosztem zwiększenia emisji CO i PM.

Według badań przeprowadzonych w Vilnius Gediminas Technical University (VGTU) stwierdzono, że zadymienie silnika o zapłonie samoczynnym zmniejsza się wraz z dodatkowym wykorzystaniem wodoru. Inne wskaźniki spalin przy wykorzystaniu wodoru w przypadku badań na stanowisku badawczym wypadają mniej korzystnie [7]. Podobne opinie zawarte są w [6, 11, 14].

Ze względu na posiadane właściwości wodór jest predestynowany bardziej do zasilania silników ZI niż ZS. Jednak ze względu na wysoką wartość opałową i możliwość ograniczenia emisji substancji toksycznych podjęto próby zasilania silników ZS wodorem [17]. Badania te ograniczały się do dodatku wodoru do paliwa. W tabeli 1 przedstawiono porównanie wybranych właściwości ON i wodoru.

Tabela 1. Porównanie właściwości ON i wodoru [9]
Table 1. Compare properties of diesel fuel and hydrogen [9]

| Właściwość | Jednostka | ON | Wodór |
|-------------------------------------|-------------------|---------|-----------------|
| Gęstość | kg/m ³ | 840 | 0,0824 ÷ 0,0838 |
| Dolna wartość opałowa | MJ/kg | 42,49 | 119,81 |
| Szybkość płomienia | m/s | 0,3 | 1,85 ÷ 1,9 |
| Liczba cetanowa | - | 45 ÷ 55 | - |
| Temperatura samozapłonu w powietrzu | °C | 280 | 585 |
| Pozostałość po koksowaniu | - | 0,1 | 0,0 |

Wpływ wodoru na przebieg procesu spalania w silnikach ZS jest podobny do opisanego wcześniej wpływu na silniki ZI (mała wartość opałowa w odniesieniu do jednostki objętości, obniżenie emisji toksycznych związków węgla, duża szybkość płomienia).

Dotychczasowe badania [9] wskazują, iż w zależności od ilości dodanego wodoru zmniejsza się sprawność cieplna silnika, zwiększa się czas opóźnienia samozapłonu i szybkość narastania ciśnienia w cylindrze (do samozapłonu mieszanki dochodzi później, lecz sam proces spalania mieszanki jest szybszy). Podwyższona temperatura powoduje wzrost stężeń tlenków azotu, jednak zauważa się znaczny spadek emisji związków węgla.

Przedmiotem pracy [2] była analiza możliwości poprawy wskaźników ekologicznych silnika o zapłonie samoczynnym AVL 5804 zasilanego dwupaliwowo (olejem napędowym z dodatkiem wodoru). Zasilanie dwupaliwowe polegało na dostarczeniu wodoru do kanału dolotowego i wykorzystaniu samozapłonu dawki oleju napędowego każdorazowo określonej dla danego obciążenia i prędkości obrotowej jako źródło zapłonu mieszanki wodór - powietrze.

Zasilanie silnika olejem napędowym z dodatkiem wodoru dostarczanych do kolektora dolotowego spowodowało wyraźną zmianę wskaźników termodynamicznych i ekologicznych tzn.:

- maksymalne zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia $dp/d\alpha$ o około 5%, i wartości ciśnienia maksymalnego w komorze spalania o około 6%,
- zwiększenie stężenia tlenu węgla o około 150%,
- zmniejszenie stężenia tlenków azotu o około 25%,
- zmniejszenie stężenia nie spalonych węglowodorów o około 300%,
- zwiększenie stężenia cząstek stałych około 150%.

Celem niniejszej pracy była eksperymentalna ocena wpływu dodatku wodoru do oleju napędowego na proces wydzielania ciepła i stężenie substancji szkodliwych w silniku o zapłonie samoczynnym.

2. Stanowisko badawcze

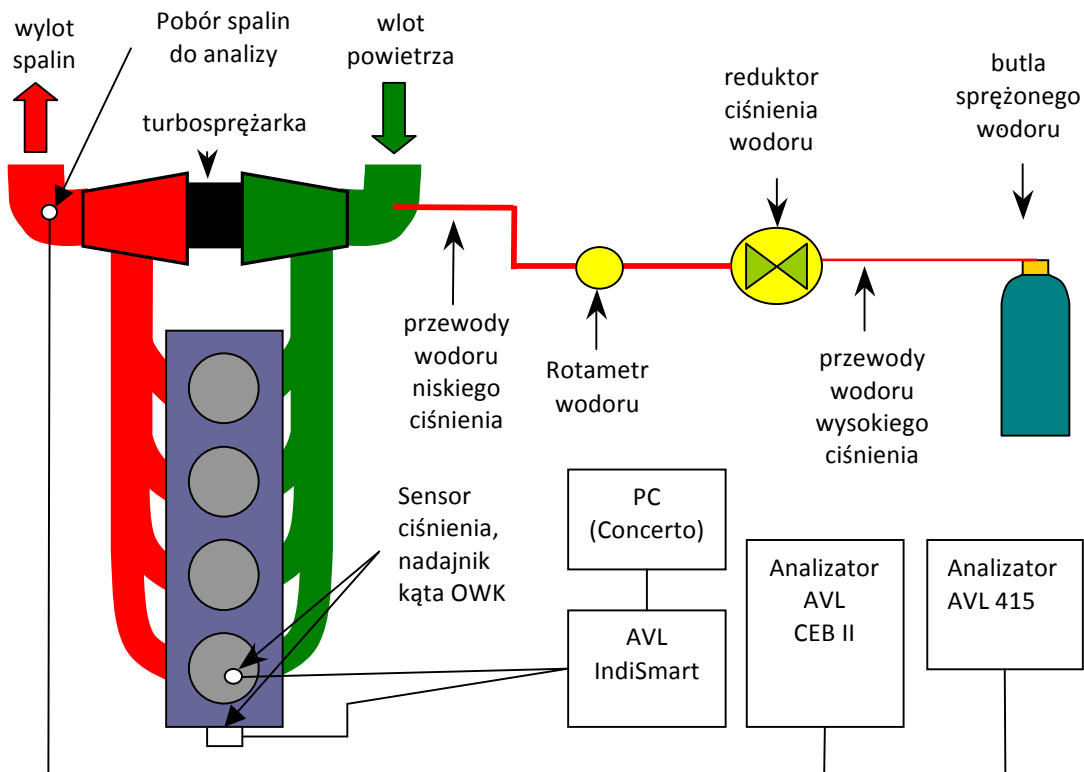
Badania przeprowadzono na silniku Perkins1104C-E44T obciążanym hamulcem elektrowirowym Schenck WM 400 kontrolowanym poprzez sterownik Schenck X-ACT. Aparatura do pomiaru ciśnienia indykowanego oraz analizy procesu wydzielania ciepła składała się z systemu AVL INDISMART do indykowania silnika, oraz czujnika położenia wału korbowego AVL 365C01. Dane z tych urządzeń były przesyłane do komputera klasy PC w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie IndiCom pozwalało na podgląd otrzymywanych danych (również w czasie rzeczywistym), rejestrację cyklu 50 pomiarów, oraz zapisanie w pliku razem z parametrami badanego silnika.

Dane te następnie poddawano obróbce w programie AVL Concerto. Program ten uśredniał przebieg ciśnienia w cylindrze oraz wyliczał szybkość wywiązywania się ciepła bez uwzględniania ciepła traconego do ścianek cylindra (ciepło wydzielone „netto”). Ponadto podczas badań rejestrowane było stężenie CO, THC, i NO_x przy pomocy analizatora spalin AVL CEB2 wyposażonego w panel sterowniczy PROVIT 5600. Pomiary stężeń PM prowadzono analizatorem AVL 415. Silnik zasilany był handlowym olejem napędowym (PKN Orlen) oraz dodatkiem wodoru z butli pod ciśnieniem 150 bar.

Pomiar zużycia ON dokonywany był metodą objętościową, natomiast pomiar dawki wodoru po redukcji jego ciśnienia dokonywano specjalnie cechowanym rotametrem. Wodór dostarczano przed turbiną do układu dolotowego silnika. Dane techniczne silnika zamieszczono w tabeli 2, natomiast schemat stanowiska badawczego zamieszczono na (rys. 1).

Tabela 2. Dane techniczne silnika Perkins 1104C-E44T
Table 2. Technical Data Engine Perkins 1104C-E44T

| Parametr | Jednostka | Wartość |
|--------------------------|-----------------|---------------------|
| Moc efektywna | kW | 74,5 |
| Stopień sprężania | [-] | 18,2 |
| Średnica cylindra | mm | 105 |
| Skok tłoka | mm | 127 |
| Pojemność skokowa | dm ³ | 4,4 |
| Liczba, układ cylindrów | [-] | 4, rzędowy |
| System zasilania paliwem | [-] | wtrysk bezpośredni |
| Doładowanie | [-] | tak; turbosprężarka |

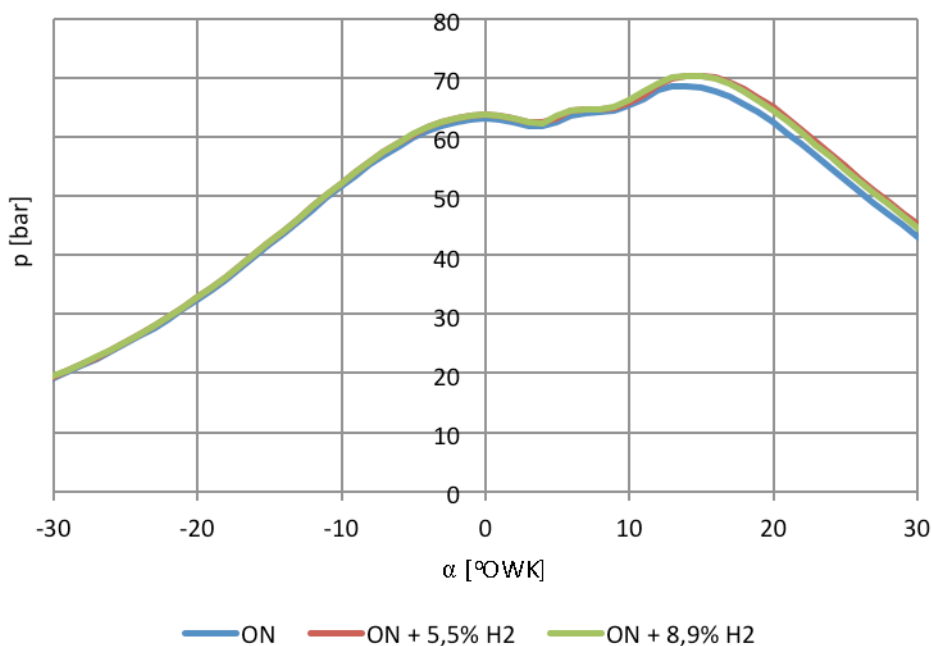


Rys 1. Schemat stanowiska badawczego ze schematem silnika Perkins 1104C-E44T

Fig. 1. Diagram of bench with the diagram of engine Perkins 1104C-E44TA

3. Wyniki badań

Badania przeprowadzono przy stałej prędkości obrotowej silnika $n = 1100$ obr/min i dawce oleju napędowego odpowiadającego momentowi obrotowemu rozwijanemu przez badany silnik na poziomie $M = 165$ Nm. Dawkowanie wodoru przeprowadzono do wartości 8,9% masy oleju napędowego, stopniowo zmniejszając dawkę oleju napędowego wraz ze wzrostem dodatku wodoru, tak aby utrzymać moment obrotowy silnika na poziomie około 165 Nm. Wyniki pomiarów ciśnienia w komorze spalania oraz wyniki obliczeń szybkości wydzielania ciepła przy pracy silnika zasilanego samym olejem napędowym oraz olejem z dodatkiem 5,5% i 8,9% masy wodoru przedstawiono odpowiednio (rys. 2, rys. 3).



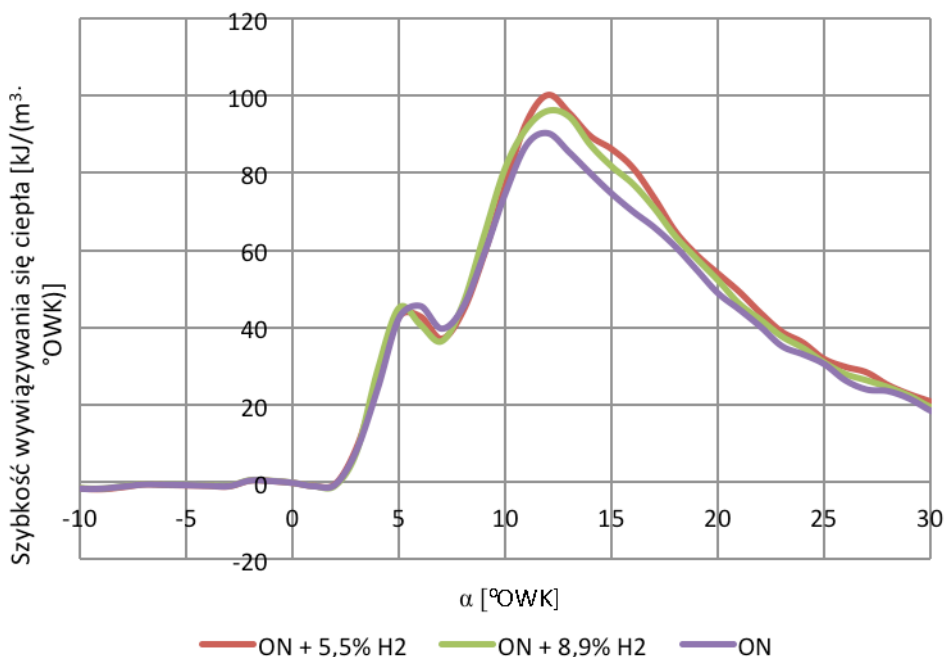
Rys 2. Wykres indykatorowy $p = f(\alpha)$ przy pracy silnika w warunkach $n = 1100$ obr/min, $M = 164$ Nm zasilanego ON oraz ON z dodatkiem 5,5% H_2 oraz 8,9% H_2

Fig. 2. An indicator diagram $p = f(\alpha)$ for the engine in the conditions of $n = 1100$ r / min, $M = 164$ Nm powered diesel and diesel with the addition of 5.5% H_2 and 8.9% H_2

Z kolei wyniki pomiarów stężeń objętościowych CO metodą NDIR, THC metodą FID, NO_x metodą CL oraz stężeń masowych PM metodą filtracyjną przy pracy silnika zasilanego olejem napędowym oraz olejem z odpowiednimi dodatkami masy wodoru przedstawiono odpowiednio (rys. 4 rys. 5).

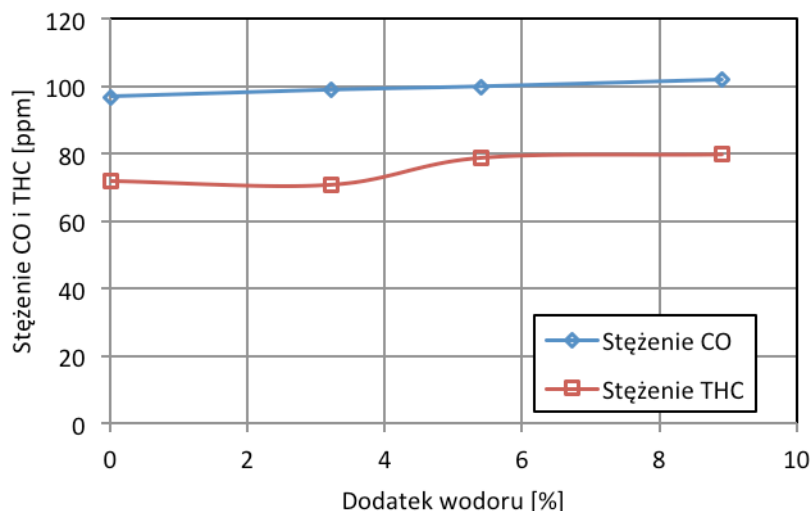
4. Analiza wyników badań i wnioski

Dodatek wodoru nie wpłynął jednoznacznie na istotne różnice w przebiegu procesu spalania. Zaobserwowano niewielką zmianę charakteru przebiegu krzywych ciśnienia w komorze spalania (wzrost maksymalnego ciśnienia spalania o około 2%). Na krzywych szybkości wywiązywania ciepła można wyróżnić klasyczną fazę kinetyczną i dyfuzyjną niezależnie od rodzaju paliwa. Faza kinetyczna pozostała



Rys 3. Szybkość wywiązywania się ciepła w funkcji °OWK przy pracy silnika w warunkach $n = 1100$ obr/min, $M = 164$ Nm zasilanego ON oraz ON z dodatkiem 5,5% H₂ oraz 8,9% H₂

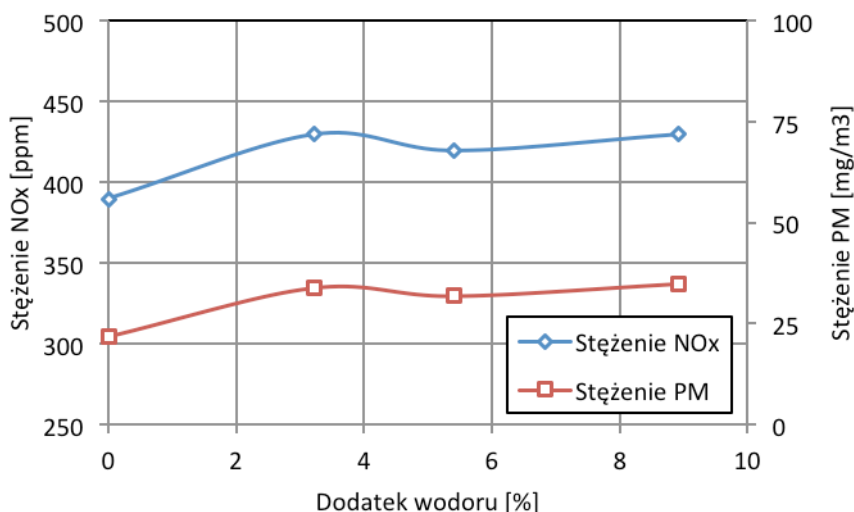
Fig 3. The rate of heat release as a function °OWK for engine operating conditions of $n = 1100$ r / min, $M = 164$ Nm powered diesel and diesel with the addition of 5.5% H₂ and 8.9% H₂



Rys. 4. Wyniki pomiarów stężeń CO oraz THC w zależności od wartości dodatku wodoru przy pracy silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkami wodoru

Fig 4. The results of the measurement of concentrations of CO and THC depending on the hydrogen addition with the engine supplied with diesel oil with additions of hydrogen

prawie identyczna natomiast w fazie spalania dyfuzyjnego stwierdzono wzrost szybkości wydzielania ciepła o około 10% prawdopodobnie z powodu spalania wodoru. Kluczowe parametry procesu spalania (zwłoka samozapłonu, charakter poszczególnych faz spalania) pozostały bez zmian po zastosowaniu dodatku wodoru.



Rys. 5. Wyniki pomiarów stężeń NO_x oraz PM w zależności od zawartości dodatku wodoru zmierzone przy pracy silnika zasilanego olejem napędowym z dodatkami wodoru

Fig 5. The results of measurements of concentrations of NO_x and PM depending on the compactness of hydrogen addition measured when the engine supplied with diesel oil with additions of hydrogen

Wyniki pomiarów stężeń substancji toksycznych nie potwierdziły teoretycznych rozważań na temat poprawy tych wskaźników. Analiza wpływu dodatku wodoru do układu dolotowego silnika o zapłonie samoczynnym wykazała niewielki, ale jednak wzrost stężeń wszystkich badanych składników spalin (tj. tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu i cząstek stałych). Wzrost stężeń CO i THC może być spowodowany przez wysoką reaktywność wodoru hamującą proces utleniania węglowodorów, w wyniku czego wzrasta stężenie THC i PM. Wzrost zawartość NO_x może być powodowany poprzez wzrost temperatury w komorze spalania w wyniku dodatku wodoru.

Dla rozsądnego użytkowania obiektów technicznych ważna jest wiedza o ich uszkodzeniach. Uszkodzenie rozumiane jest przy tym jako graniczny stan obiektu, niebezpieczny dla ludzkiego życia i/lub strat finansowych [16].

Zdolność obiektu do wypełniania żądanych funkcji to jego niezawodność. Niektóre cechy obiektu to: dostępność, wytrzymałość, naprawialność, bezpieczeństwo, obsługa i trwałość. Trwałość jest ważnym elementem w łańcuchu niezawodności [16].

O trwałości może świadczyć dla przykładu trwałość pierścieni tłokowych silnika zasilanego wodorem [16]. Według [16] przy zasilaniu silnika wodorem spodziewane może być szybsze zużycie pierścieni tłokowych niż w przypadku zasilania go benzyną. Ważnym przy oddziaływaniu paliwa na trwałość silnika jest wartość opałowa paliwa i jego skład [16], także w silnikach o zapłonie samoczynnym.

W podsumowaniu można stwierdzić iż analiza wyników badań nie uzasadnia stosowania wodoru jako dodatku do paliwa w silnikach o zapłonie samoczynnym.

Literatura

1. Brzeżański M, Marczyk M, Marek W, Papuga T. Określenie parametrów ekologicznych stacjonarnego silnika spalinowego zasilanego różnymi paliwami. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów 2014; 1(97): 101-108.

2. Daszkiewicz P. Badania możliwości poprawy wskaźników ekologicznych silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami konwencjonalnymi z domieszką wodoru. Praca doktorska 2014; 1-123.
3. Deczyński J, Żółtowski B. Wodór jako paliwo alternatywne do zasilania silników ze spalaniem wewnętrznym. Studies & Proceedings of Polish Association 2014; (69): 19-31.
4. Doppler M. Rozwój i przyszłość napędu hybrydowo-wodorowego dla samochodów. Akademia Górniczo-Hutnicza 2005; 1-7.
5. HYICE Result in Brief 2015; 1-4.
6. Jarunthammachote S, Chuepeng S, Chaisermtawan P. Effect of hydrogen addition on diesel engine operation and NO_x emission: A thermodynamic study. Am. J. Applied Sci. 2012; (9): 1472-1478.
7. Keršys A, Kilisinskas D, Pukalaskas S, Vilkauskas A, Keršys R, Makaras R. Investigation of the Influence of Hydrogen Used in Internal Combustion Engines on Exhaust Emission. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2013; 15 (4): 384-389.
8. Kosar M, Ozdalyan B, Celik M B, The Usage of Hydrogen for Improving Emissions and Fuel Consumption in a Small Gasoline Engine. Journal of Thermal Science and Technology 2011; 31(2): 101-108.
9. Lejda K. Wodór w aplikacjach do środków napędu w transporcie drogowym, Wydawnictwo KORAW 2013; 1-169.
10. Ma F, Wang Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark ignition engine. International Journal of Hydrogen Energy 2008; (33): 1416-1424.
11. Miyamoto T, Hasegawa H, Mikami M, Kojima N, Kabashima H. Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of diesel engine. International Journal of Hydrogen Energy 2011; (36): 13138-13149.
12. Ortezi F, Chiesa M, Conigli F. Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light Duty Vehicles. HYSYDAYS - 2nd World Energy Systems 2007; 1-11.
13. Rusu E, Pana C, Negurescu N. Experimental Study of a Spark Ignition Engine Fueled with Gasoline and Hydrogen in Addition. U.P.B. Sci. Bull., Series D 2013; 75(4): 127-136.
14. Saravanan N, Nagarajan G. Performance and emission studies on port injection of hydrogen with varied flow rates with Diesel as an ignition source. Applied Energy 2010; (87): 2218-2229.
15. Shivaprasad K V, Raviteja S, Chitragar P, Kumar G N: Experimental Investigation of the Effect of Hydrogen Addition on Combustion Performance and Emissions Characteristics of a Spark Ignition High Speed Gasoline Engine. Procedia Technology 2014; (14): 141-148.
16. Sroka Z. Durability of engine components due to alternative fuels. Eksploatacja i Niezawodność- Maintenance and Reliability 2007; (4): 9-15.
17. Surygała J. Wodór jako paliwo, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2008; 1-177.

Stanisław KRUCZYŃSKI

Marcin ŚLĘZAK

Wojciech GIS

Instytut Transportu Samochodowego

Ul. Jagiellońska 80, 03-301, Warszawa, Polska

Piotr ORLIŃSKI

Instytut Pojazdów PW

Ul. Narbutta 84, 02-524, Warszawa, Polska

E-mail: stanislaw.kruczynski@its.waw.pl, marcin.slezak@its.waw.pl,
wojciech.gis@its.waw.pl, p.orlinski@simr.pw.edu.pl