

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 doświadczalne 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

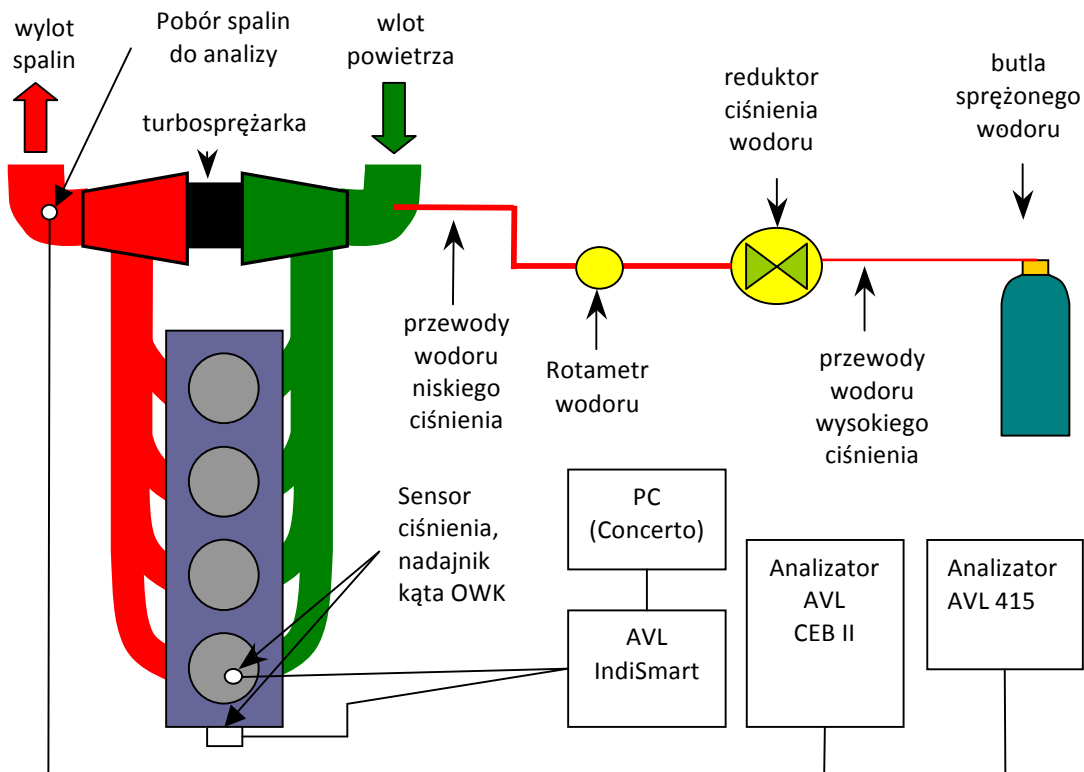
Badania przeprowadzono na silniku Perkins1104C-E44T obciążanym hamulcem elektrowirowym Schenck WM 400 kontrolowanym poprzez sterownik Schenck X-ACT. Aparatura do pomiaru ciśnienia indykowanego oraz analizy procesu wydzielania ciepła składała się z systemu AVL INDISMART do indykowania silnika, oraz czujnika 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

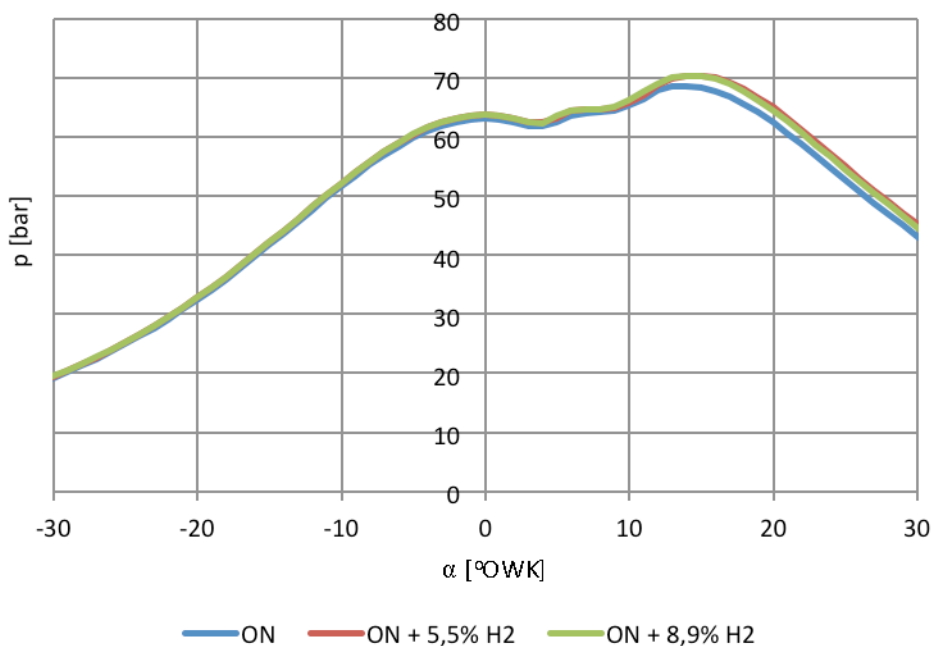


Rys 1. Schemat stanowiska badawczego ze schematem silnika Perkins 1104C-E44T

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).



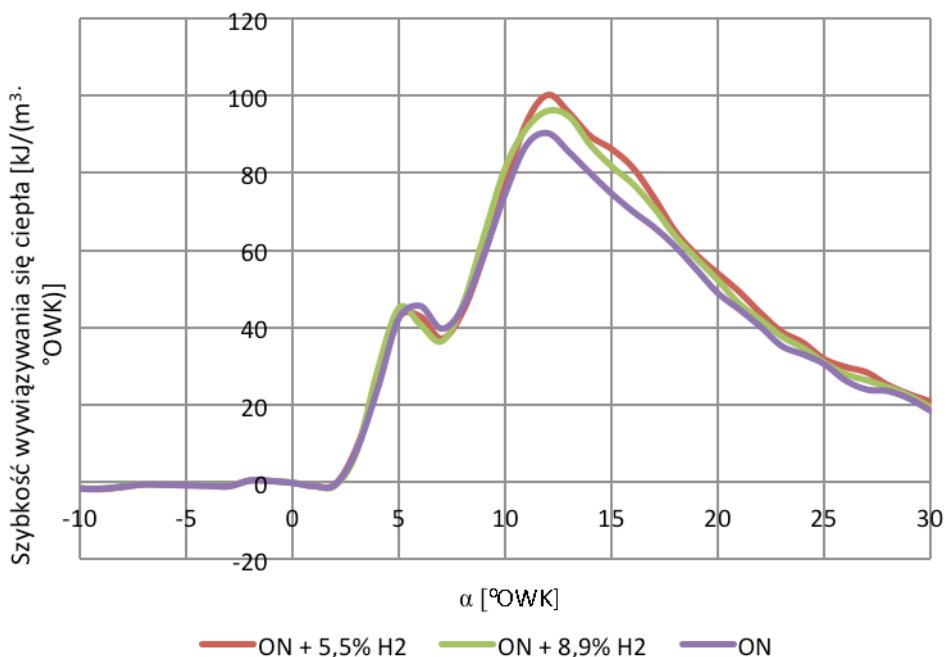
Rys 2. Wykres indykatorowy $p = f(\alpha)$ przy pracy silnika w warunkach $n = 1100$ obr/min, $M = 164$ Nm zasilanego ON oraz ON z dodatkiem 5,5% H_2 oraz 8,9% H_2

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).

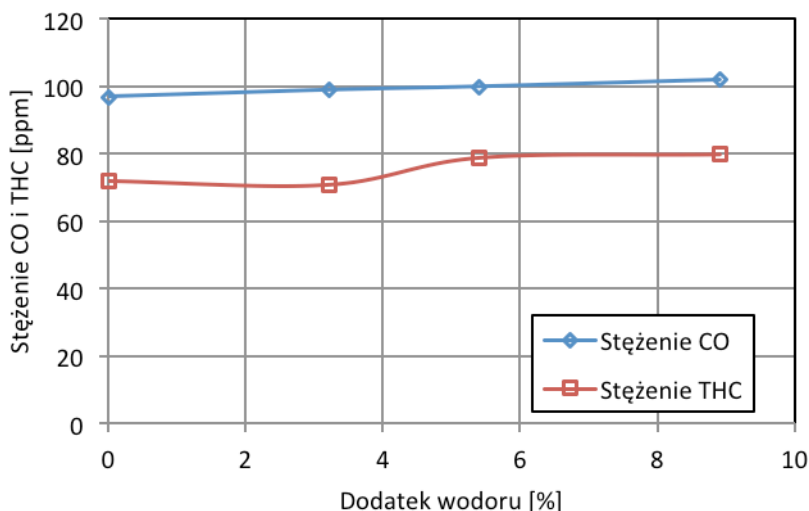
4. Analiza wyników badań i wnioski

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% H_2 oraz 8,9% H_2

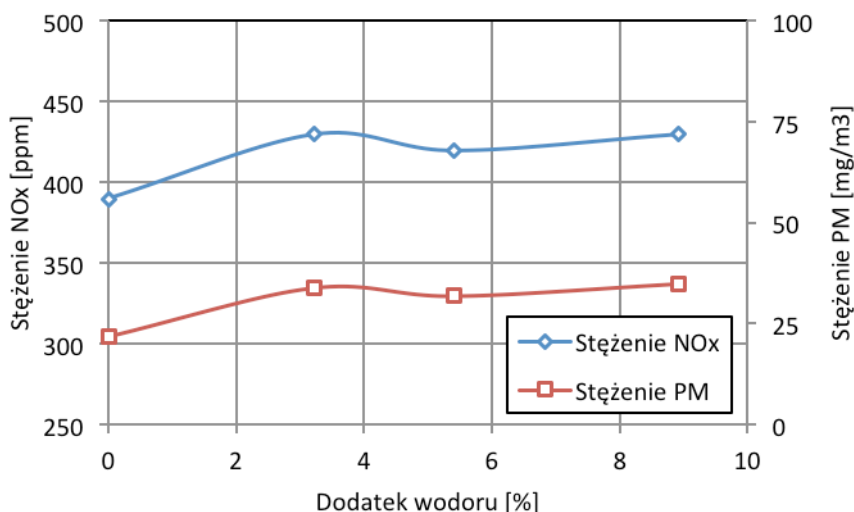
Fig 3. The rate of heat release as a function °OWK for engine operating conditions of $n = 1100$ r / min, $M = 164$ Nm powered diesel and diesel with the addition of 5.5% H_2 and 8.9% H_2



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 trough 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 floe rateswith 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 componants due to alternative fuels. Eksploatacja i Niezawodność- Maintanance 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