

DASZKIEWICZ Paweł, IDZIOR Marek, BAJERLEIN Maciej, KAPRIUK Wojciech

## **PERSPEKTYWA PROGRESU WSKAŹNIKÓW EKOLOGICZNYCH SILNIKA BADAWCZEGO ZASILANEGO OLEJEM NAPĘDOWYM Z DOMIESZKĄ WODORU**

### *Streszczenie*

*Praca składa się z dwóch części. Pierwsza prezentuje zagadnienia teoretyczne dotyczące wodoru jako paliwa alternatywnego do zastosowania w silniku z zapłonem samoczynnym. Drugą część stanowi analiza wyników badań współspalania wodoru rozpuszczonego w oleju napędowym. Badania miały na celu ocenę wpływu dodatku wodoru na stężenie związków toksycznych emitowanych przez silnik badawczy. Badania zostały przeprowadzone w trzech wariantach. Pierwszy wariant stanowił poziom odniesienia do pozostałych wyników i został przeprowadzony na silniku zasilanym niewzbogacanym olejem napędowym. W przypadku drugiego i trzeciego wariantu do silnika był dostarczony roztwór oleju napędowego z wodorem wprowadzony do mieszalnika przy ciśnieniu 0,1 bar i 0,2 bar nadciśnienia.*

### **WSTĘP**

Silniki realizujące samoczynny zapłon mieszanki paliwowo-powietrznej znajdują zastosowanie w dużej grupie pojazdów poczynając od silników okrętowych, przez maszyny robocze i maszyny wolnobieżne, a na ciężarówkach, autobusach i samochodach pasażerskich kończąc. Atrakcyjność silników z zapłonem samoczynnym polega na osiągnięciu przez nie wyższych w stosunku do silników benzynowych wartości sprawności ogólnej przy równocześnie zbliżonych przebiegach charakterystyk mocy i momentu obrotowego.

Aktualnie oprócz dążenia konstruktorów silników do jak najbardziej sprawnego wykorzystania energii zawartej w paliwie, dąży się również do tego, aby w produktach spalania była jak najmniejsza ilość związków szkodliwych. Źródłem nowego trendu w rozwoju silników było udowodnienie w 1952 roku w Kalifornii negatywnego wpływu spalin emitowanych przez silnik spalinowy na środowisko naturalne i atmosferę. Stąd kolejnym celem konstruktorów jest obniżenie emisji związków, które przyczyniają się do degradacji środowiska naturalnego [1,2].

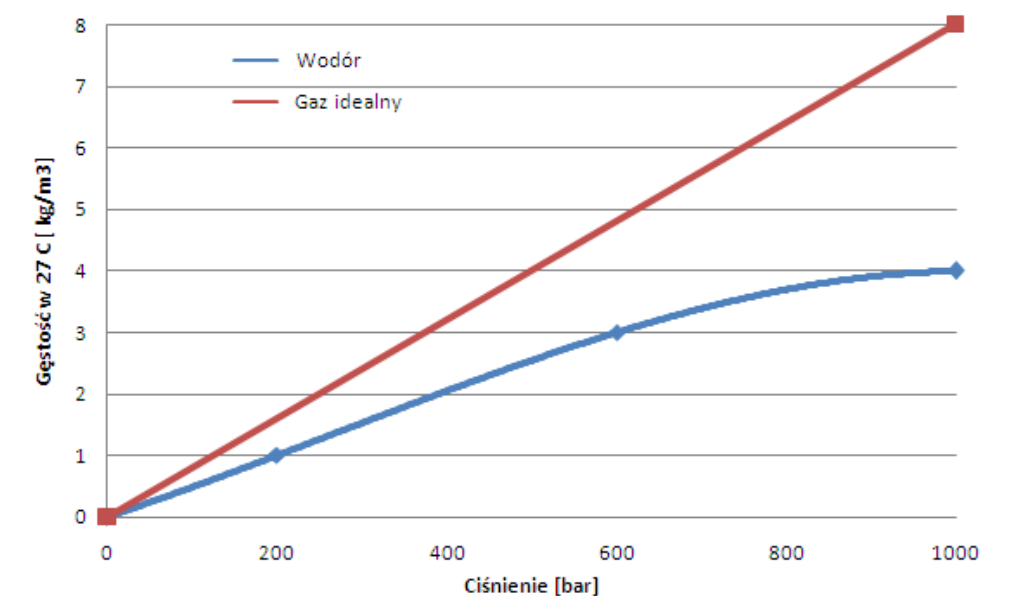
Nową koncepcją rozwoju silników oprócz przekonstruowania i tworzenia innowacyjnych układów zasilania i oczyszczania spalin jest poszukiwanie alternatywnych źródeł paliwa, które samoistnie, bądź w mieszaninie z konwencjonalnym paliwem przyczyniałyby się do obniżenia emisji związków toksycznych przy zmianie parametrów użytkowych. Uzasadnieniem powyższej koncepcji rozwoju silników jest także, ograniczona liczba paliw konwencjonalnych, których zasoby z roku na rok maleją [3]. Poszukiwanie alternatywnego paliwa jest w związku z tym bardziej uzasadnione. Paliwo nowego typu powinno być łatwo dostępne, a spaliny wolne od związków toksycznych. Związkiem spełniającym takie założenia jest bez wątpienia wodór, który pomimo występowania w formie wolnej w

atmosferze ziemskiej stanowi 0,1 ppm natomiast w formie związanej z tlenem tworzy wodę, której zasoby można traktować jako niewyczerpalne. W wyniku spalania wodoru powstaje woda, którą ponownie można poddać procesowi elektrolizy, dzięki czemu wódór tworzy zamknięty obieg energetyczny [5].

## 1. WODÓR – PALIWO DO SILNIKÓW O ZS

### 1.1. Właściwości fizyczne i chemiczne wodoru

Wódór posiada najwyższą ze wszystkich pierwiastków przewodność cieplną wynoszącą 0,1745 W/(m•K), oraz ciepło właściwe o wartości 14,195 kJ/(kg•K) (w 273 K). W porównaniu do konwencjonalnych paliw dysponuje najwyższą wartością energii w odniesieniu do jednostki masy równą 121MJ/kg (dla przykładu – węgiel 25 MJ/kg, benzyna 47 MJ/kg). W stosunku do jednostki objętości, z powodu małej gęstości w stanie gazowym (273K, 1013hPa) wynoszącej 0,089 kg/m<sup>3</sup>, jego wartość energetyczna nie jest już imponująca i wynosi 10,7 MJ/m<sup>3</sup>. Gęstość wodoru można zwiększyć podnosząc jego ciśnienie. Jednak przyrost ten nie jest tak znaczny jak mogłoby to mieć miejsce w przypadku gazu doskonałego – różnicę tę przedstawiono na wykresie (rys 1.1).



Rys. 1.1. Zależność gęstości wodoru gazowego od ciśnienia (w 27°C) [4]

Z tego powodu pożądanym jest zastosowanie wodoru w postaci płynnej o gęstość 70,8 kg/m<sup>3</sup>. Niska temperatura skraplania wynosząca -253°C stwarza jednak znaczne problemy techniczne w zastosowaniu i magazynowaniu wodoru w postaci ciekłej. Innymi przeszkodami stosowania wodoru jest jego zdolność dyfundowania przez gumę, materiały porowate i w podwyższonej temperaturze przez stal, co znacznie utrudnia jego magazynowanie oraz przyczynia się do niszczenia materiałów.

W zależności od temperatury w warunkach ciśnienia otoczenia wódór występuje w trzech różnych stanach skupienia:

- gaz – powyżej temperatury wrzenia 20 K,
- ciecz – w temperaturze 14-20 K,
- ciało stałe – w temperaturze poniżej 14 K.

Posiada on bardzo wąski zakres stanu ciekłego. Aby poszerzyć ten zakres należy podnieść ciśnienie w zbiorniku, w którym wódór ma być przechowywany. Działanie tego typu nie przynosi jednak oczekiwanego rezultatu jak ma to miejsce w przypadku innych gazów. Zwiększenie ciśnienia o 130 bar powoduje podniesienie temperatury wrzenia zaledwie o 13 K

i wynosi ona 33 K [8,9]. Dalszy wzrost ciśnienia nie powoduje już wzrostu temperatury wrzenia. Porównanie parametrów wodoru w różnych stanach skupienia przedstawiono w tabeli 1.1.

**Tab. 1.1** Parametry stanu skupienia wodoru [7]

Parametry	Wartość
Temperatura wrzenia (1 atm), K (°C)	20 ( - 253 )
Temperatura krystalizacji (1 atm), K (°C)	14 ( - 259 )
Gęstość gazu w 20°C (1 atm), kg/m <sup>3</sup>	0,08376
Gęstość cieczy w temperaturze wrzenia (1 atm), kg/m <sup>3</sup>	70,8
Gęstość kryształów w temp. kryst. (1 atm), kg/m <sup>3</sup>	88,0
Objętość właściwa gazu w 20°C (1 atm), m <sup>3</sup> /kg	11,9
Objętość właściwa cieczy w -253°C (1 atm), m <sup>3</sup> /kg	0,014
Gęstość względna gazu (względem powietrza)	0,0696
Gęstość względna cieczy (względem wody)	0,0708
Współczynniki ekspansji ciec-z-gaz w 20°C (1atm), 1/l	1:848
Współczynnik rozprężania (od 250 do 1atm), 1/l	1:240
Współczynnik zawartości H <sub>2</sub> w cieczy, kg/m <sup>3</sup>	
• wodór ciekły	71
• woda	111
• metanol	100

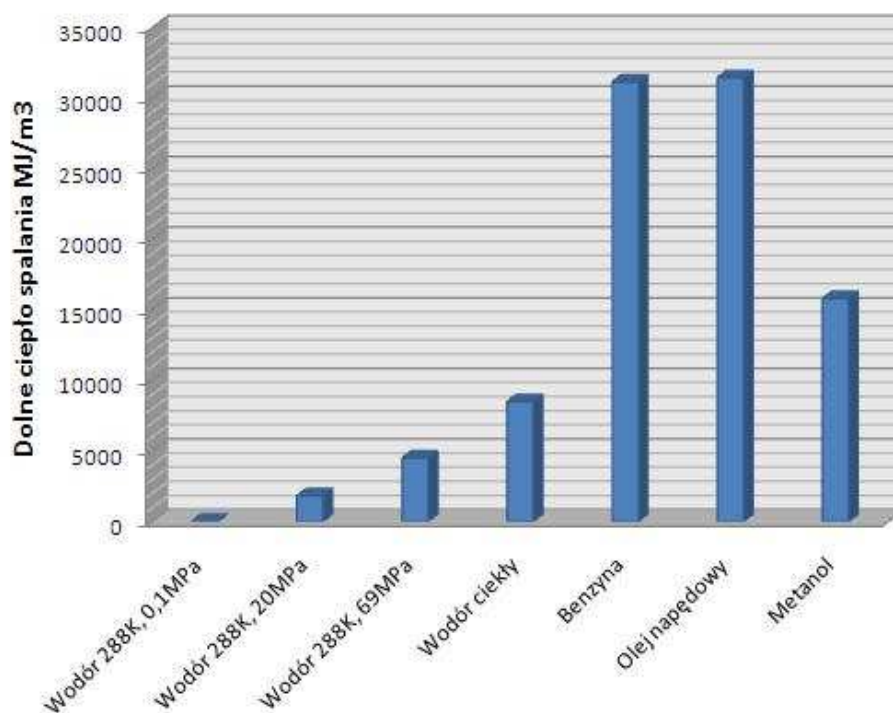
## 1.2. Właściwości wodoru jako paliwa

W wyniku spalania wodoru z tlenem otrzymuje się wodę i energię. Zaletą tego procesu jest powstawanie związków nieszkodliwych dla środowiska naturalnego, czego nie spotyka się w przypadku paliw węglowodorowych. Energia uzyskana w procesie utleniania po zmierzeniu pozwala na wyznaczenie górnego i dolnego źródła ciepła spalania. Różnica między tymi wartościami stanowi ciepło odparowania, które stanowi część energii potrzebnej do zamiany paliwa ze stanu ciekłego w stan gazowy i zamianę ciała stałego w ciecz. Wartości dolnego i górnego ciepła spalania zestawiono w tabeli 1.2.

**Tab. 1.2** Ciepło spalania wodoru i paliw silnikowych [7]

Paliwo	Górne ciepło spalania (25°C, 0,1MPa) kJ/g	Dolne ciepło spalania (25°C, 0,1MPa) kJ/g
Wodór	141,86	119,93
Metan	55,53	50,02
Propan	50,36	45,60
Benzyna	47,50	44,50
Olej napędowy	44,80	42,50
Metanol	19,96	18,05

Wynika z nich, że wodór ma największy stosunek energii do masy co sprawia, że jest on bardzo atrakcyjnym paliwem. Ponadto duże ciepło spalania powoduje, że siła eksplozji wodoru jest 2,5 razy większa niż popularnych paliw węglowodorowych. Niska gęstość wodoru przyczynia się do niskiej gęstości energetycznej tego paliwa, co sprawia duże problemy z magazynowaniem dostatecznej ilości energii w pojeździe. Zestawienie ilości energii w zależności od stanu skupienia paliw gazowych i płynnych przedstawiono na rysunku 1.2.



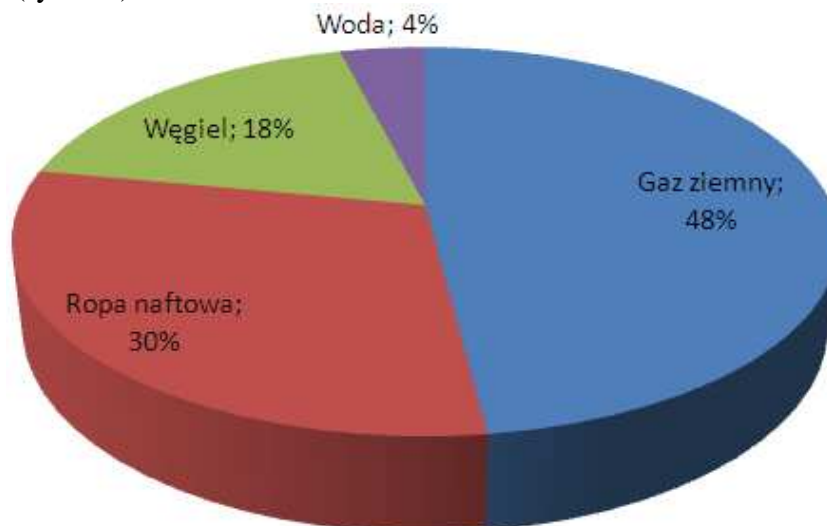
**Rys. 1.2.** Porównanie gęstości energii paliw konwencjonalnych i wodoru w różnych stanach skupienia

Wodór posiada szeroki **zakres palności** od 4 do 75% objętości wodoru w powietrzu, który poszerza się wraz ze wzrostem temperatury. Szeroki zakres palności jest zaletą tego paliwa jednak posiada on jeszcze szerszy **zakres wybuchowości** zawierający się w granicach od 15 do 95% V/V, co przysparza trudności w bezpiecznym eksploataowaniu tego paliwa.

**Temperatura zapłonu** paliw jest zawsze niższa od temperatury wrzenia i dla wodoru wynosi  $-253^{\circ}\text{C}$ . Wielkość energii potrzebnej do zainicjowania procesu spalania wyrażona jest **energiami zapłonu**. Dla wodoru energia ta jest o rząd wielkości mniejsza w stosunku do konwencjonalnych paliw i wynosi 0,02 mJ. Oznacza to, że inicjatorem zapłonu może być niewidzialna iskra, a nawet elektryczność statyczna ciała ludzkiego w warunkach suchych [35, 28]. Kolejnym parametrem jest **szybkość spalania**, opisująca prędkość z jaką płomień przesuwa się przez palną mieszaninę gazów. W przypadku wodoru mieści się ona w przedziale  $\approx 2,65 - 3,25$  m/s. Wodór jak wszystkie paliwa konwencjonalne posiada temperaturę, w której nastąpi jego spalanie bez udziału obcego źródła ciepła. Temperatura ta, określana jako **temperatura samozapłonu** wynosi dla wodoru  $585^{\circ}\text{C}$ . Warunki w jakich może istnieć i propagować otwarty płomień w mieszaninie paliwowo-powietrznej jest ograniczony przez **odległość krytyczną propagacji płomienia**. Wartością opisującą tę wielkość jest szerokość szczeliny, która dla mieszaniny wodoru z powietrzem w warunkach normalnych wynosi 0,6 mm (dla konwencjonalnych paliw szerokość szczeliny równa się 2 mm). Przyczyną tego zjawiska jest ochłodzenie płomienia poprzez ścianki szczeliny [1].

### 1.3. Metody otrzymywania wodoru

Wodór w wolnej postaci zarówno w skorupie ziemskiej jak i w atmosferze występuje w śladowych ilościach i nie można go wydobywać jak ma to miejsce w przypadku paliw konwencjonalnych. Otrzymuje się go w wyniku rozpadu związków, których jest składnikiem, i obecnie do celów przemysłowych jest on pozyskiwany z naturalnych surowców energetycznych (rys. 1.3).



Rys. 1.3. Udział surowców naturalnych w przemysłowym wytwarzaniu wodoru

Metodami przemysłowymi pozyskiwania tego związku są [7]:

- reforming parowy metanu lub innych węglowodorów małowczątkowych – podstawowymi surowcami do tego procesu są: metan, gaz ziemny, LPG lub benzyna. Wodór powstaje w wyniku działania na związki węglowodorowe parą wodną o podwyższonej temperaturze i w obecności katalizatorów niklowych. W wyniku szeregu reakcji uzyskuje się gaz syntezowy będący mieszaniną:  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  i śladowych ilości  $CH_4$  i  $H_2O$ . Następnym krokiem jest przetworzenie gazu syntezowego w wyniku reformingu uzyskując półprodukt o zawartości do 76% wodoru cząsteczkowego. Ostatnim krokiem jest usunięcie ditlenku węgla. Ostatecznie uzyskuje się wodór o czystości 95 – 98% V/V.
- odzysk wodoru z gazowych produktów przetwarzania ropy naftowej i węgla. W zależności od pochodzenia półproduktu który może różnić składem oraz zanieczyszczeniem, w przemyśle stosowane są trzy metody do pozyskania wodoru z takiego surowca. Pierwszym sposobem jest proces adsorpcyjny PSA (pressure swing adsorption). Metoda ta wykorzystuje małą reaktywność wodoru. Polega ona na przepuszczeniu strumienia gazu zawierającego od 70% do 90% V/V wodoru pod ciśnieniem 10 – 40 bar w temperaturze 20 - 40°C przez warstwę absorbentu, tj. granulek wykonanych z wąskoporowatego zeolitu. Na skutek przetłaczania gazu przez złożę zeolitu następuje adsorbcja węglowodorów w tym złożu. Otrzymany gaz zawiera około 9 – 99,9% czystego wodoru [10]. Innym sposobem odzysku wodoru jest metoda niskotemperaturowa wykorzystująca niską temperaturę wrzenia wodoru. Poprzez ochładzanie gazu następuje przemiana fazowa i wykroplenie węglowodorów stanowiących zanieczyszczenie gazu. Proces jest prowadzony w temperaturze od -153°C do -173°C. Czystość wodoru uzyskana w tej metodzie przekracza 95% V/V  $H_2$ . Ostatnim znaczącym sposobem przemysłowego oczyszczania wodoru jest metoda dyfuzyjna wykorzystująca zjawisko „przenikania” wodoru przez membrany palladowe. W wyniku dysocjacji cząsteczki wodoru na powierzchni membrany następuje jej rozpad [6, 9]. Tak rozłożona cząsteczka podlega jonizacji. Po przejściu przez membranę



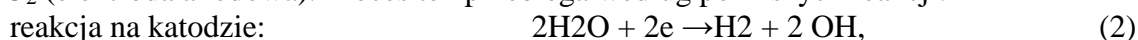
proton przyłącza elektron i tworzy atom wodoru. Tak powstałe atomy tworzą cząsteczki. Proces przebiega w temperaturze 300 – 700°C przy ciśnieniu 10 – 15 bar.

- częściowe utlenianie pozostałości rafineryjnych – w obecności pary wodnej w temperaturze oscylującej w granicach 1250 – 1600°C i pod ciśnieniem 150 bar odbywa się niecałkowite utlenianie węglowodorów zachodzące według reakcji:



W wyniku przebiegu reakcji otrzymuje się gaz syntezowy, który po oczyszczeniu metodą PSA pozwala na uzyskanie wodoru o czystości 99,9%.

- **zgazowywanie węgla** – proces polega na działaniu parą wodną na rozżarzony koks o temperaturze 1000 – 1200°C prowadząc do powstania gazu wodnego (CO + H<sub>2</sub>) [5]. Następnie powstały gaz jest poddany konwersji przy użyciu pary wodnej w obecności katalizatora. Proces przebiega w temperaturze 300 – 450°C.
- **elektrolityczny rozkład wody** – pod wpływem energii elektrycznej następuje rozpad cząsteczki wody na wodór cząsteczkowy H<sub>2</sub> (elektroda katodowa) i tlen cząsteczkowy O<sub>2</sub> (elektroda anodowa). Proces ten przebiega według poniższych reakcji:



Przemysłowe sposoby produkcji wodoru mają różną sprawność energetyczną procesu, która wpływa na koszt jego produkcji. Również ważnym aspektem jest ekologiczność danej metody, a w szczególności emisja CO<sub>2</sub> do atmosfery. W tym aspekcie bezkonkurencyjna jest metoda elektrolizy wody, jednak energia elektryczna do napędu tego procesu musi pochodzić ze źródeł odnawialnych. Wybrane parametry produkcji wodoru określonymi metodami przedstawiono w tabeli 1.3.

**Tab. 1.3** Parametry wytwarzania wodoru różnymi metodami [5]

Parametr	Reforming parowy metanu	Gazyfikacja gudronu	Gazyfikacja węgla	Elektroliza wody
Surowiec	gaz ziemny	gudron	węgiel	woda
Sprawność cieplna [%]	78,5	76,8	63,2	27,2
Produkty uboczne	para	siarka	siarka	tlen
Względny koszt inwestycyjne	1,00	2,22	3,43	1,43
Względne koszty produkcji	1,00	1,52	2,11	3,19

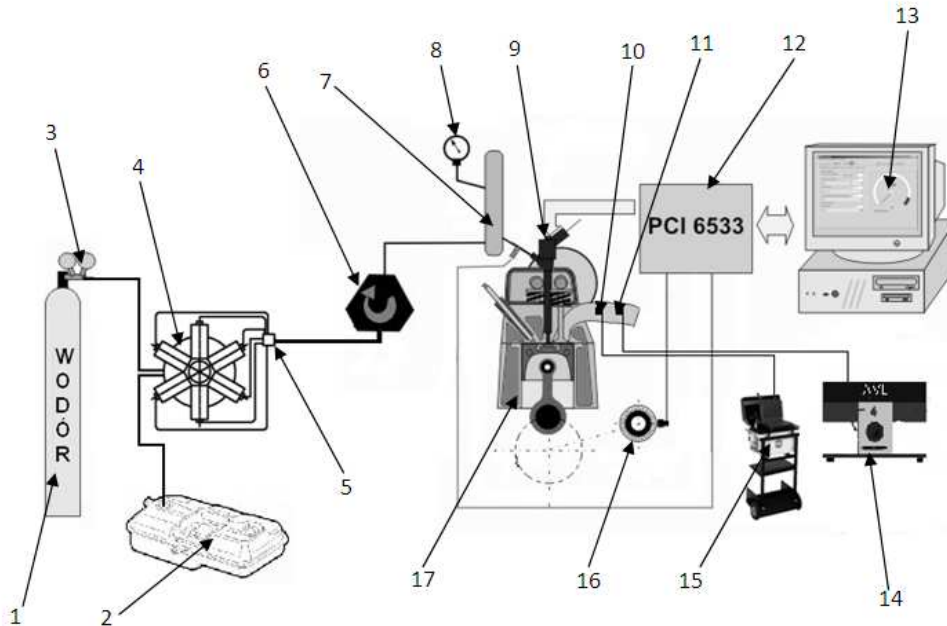
## 2. BADANIE SPALANIA WODORU W SILNIKU O ZS

### 2.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Badania silnikowe zostały przeprowadzone na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 2.1. W skład stanowiska wchodziły takie elementy jak :

- silnik badawczy AVL 5804,
- hamulec prądnicowy AMK ASYN typ DW13-170-4-AOW,
- pompa pełniąca funkcje mieszalnika oleju napędowego z wodorem,
- pompa wysokiego ciśnienia i akumulator paliwa układu common rail,
- wtryskiwacz sterowany cewką elektromagnetyczną marki BOSCH 0445 110 131,

- kontroler umożliwiający sterownie układu common rail - PCI 6533,
- analizatory spalin: Testo 360, AVL Opacimeter 438, dymomierz Bosch,
- układ stabilizacji temperatury cieczy chłodzącej silnika i oleju smarującego AVL 577,
- butla z wodorem w stanie gazowym o pojemności 6 m<sup>3</sup> i ciśnieniu magazynowania 150 bar.



**Rys. 2.1.** Schemat stanowiska badawczego: 1 – butla z gazowym wodorem; 2 – zbiornik oleju napędowego; 3 – reduktor ciśnienia; 4 – pompa wytwarzająca roztwór; 5 – akumulator zbiorczy roztworu; 6 – pompa wysokiego ciśnienia układu CR4c; 7 – akumulator układu CR; 8 – manometr; 9 – wtryskiwacz BOSCH; 10 – sonda pomiarowa analizatora Testo 360; 11 – sonda pomiarowa analizatora AVL; 12 - karta cyfrowa PCI 6533; 13 – komputer umożliwiający zadawanie parametrów wtrysku; 14 - analizator AVL 438 Opacimeter; 14 - analizator Testo 360; 16 – znacznik kąta położenia wału korbowego; 17 - silnik badawczy AVL 5804

Silnik AVL 5804 jest jednocylindrowym silnikiem wyposażonym w cztero zaworową głowicę z dwoma wałkami rozrządu. W celu umieszczenia endoskopu w silniku stosowanym podczas badań jeden z zaworów wydechowych został zaślepiony. Podstawowe parametry silnika badawczego AVL 5804 zostały zaprezentowane w tabelicy 2.1.

**Tab. 2.1** Podstawowe parametry silnika AVL 5804

Lp.	Parametr	Jednostka	Wartość
1.	Pojemność skokowa	cm <sup>3</sup>	510,7
2.	Średnica cylindra	mm	85
3.	Skok tłoka	mm	90
4.	Objętość komory spalania:	cm <sup>3</sup>	23,63
5.	Stopień sprężania	[ - ]	19,9
6.	Moc maksymalna przy 4200 obr/min,	kW	16
7.	Moment obrotowy przy 2000 obr/min	Nm	53
8.	Średnie ciśnienie użyteczne w wersji doładowanej przy 2000 obr/min,	MPa	1,22
9.	Jednostkowe zużycie paliwa przy maksymalnej wartości momentu obrotowego	g/(kWh)	251
10.	Jednostkowe zużycie paliwa przy mocy znamionowej	g/(kWh)	287
11.	Maksymalna prędkość obrotowa	obr/min	5000
12.	Maksymalne ciśnienie w cylindrze	MPa	15,0

Celem badań było porównanie wpływu dodatku wodoru do oleju napędowego na emisję związków toksycznych i zadymienie spalin. Badania zostały przeprowadzone w trzech wariantach. Pierwszy wariant stanowił poziom odniesienia do pozostałych wyników i został przeprowadzony na silniku zasilanym niewzbogacanym olejem napędowym. W przypadku drugiego i trzeciego wariantu do silnika był dostarczony roztwór oleju napędowego z wodorem wprowadzony do mieszalnika przy ciśnieniu 0,1 bar i 0,2 bar nadciśnienia.

## 2.2. Wyniki i analiza badań

Wyniki badań, które stanowią stężenia poszczególnych związków toksycznych występujących w spalinach oraz stopień ich zadymienia w zależności od rodzaju zastosowanej mieszanki paliwowej, prędkości obrotowej silnika z uwzględnieniem stopnia recyrkulacji spalin oraz od czasu wtrysku przedstawiają tabele 2.2 i 2.3.

**Tab. 2.2** Stężenie poszczególnych związków toksycznych dla poszczególnych paliw przy prędkości obrotowej silnika 1200 obr/min

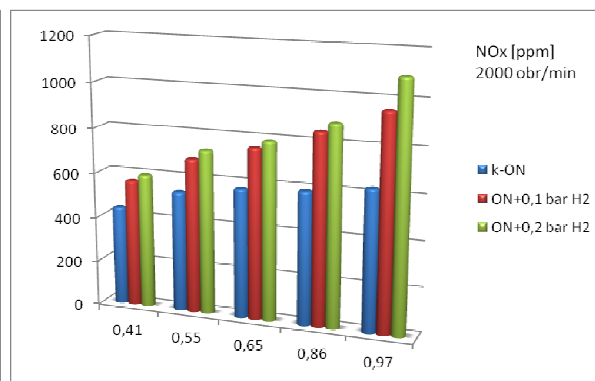
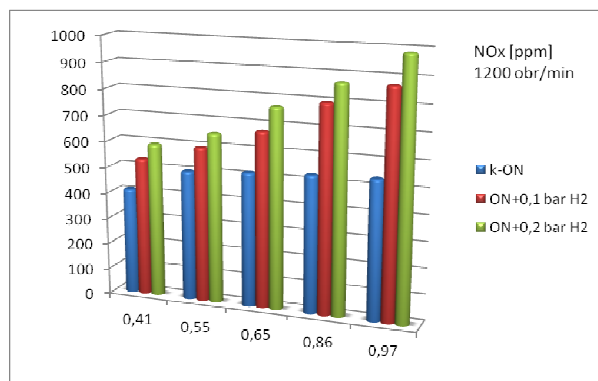
1200 obr/min	ON bez dodatku	ON+0,1 bar H <sub>2</sub>	ON+0,2 bar H <sub>2</sub>	ON bez dodatku	ON+0,1 bar H <sub>2</sub>	ON+0,2 bar H <sub>2</sub>
<b>t [ms]</b>	<b>NOx [ppm]</b>			<b>CO [ppm]</b>		
0,41	411	534	594	314,5	243	126
0,55	501	596	653	480,5	317	214
0,65	517	675	769	800,5	521	413
0,86	529	796	871	1204,5	989	740
0,97	536	871	987	1797	1308	1127
	<b>HC [%]</b>			<b>D [jB]</b>		
0,41	0,1301	0,11	0,081	2,86	2,1	1,6
0,55	0,1269	0,082	0,069	4,05	2,7	2



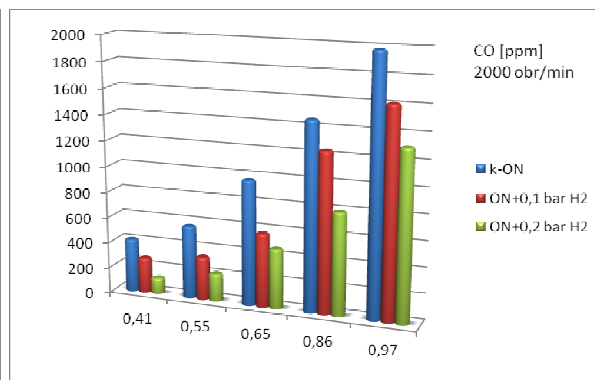
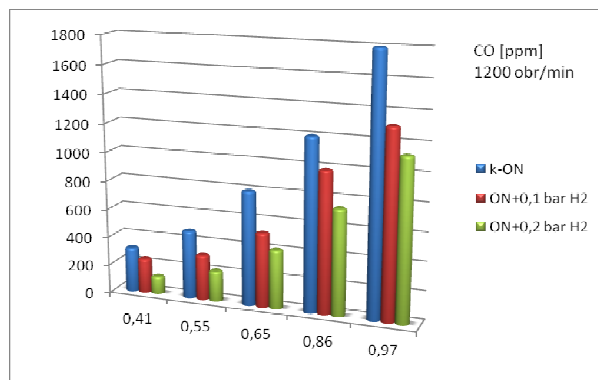
0,65	0,1507	0,093	0,076	5,51	2,8	2,5
0,86	0,1804	0,141	0,118	7,3	3,93	4,64
0,97	0,2103	0,184	0,135	8	6,2	5,43

**Tab. 2.3** Stężenie poszczególnych związków toksycznych dla poszczególnych paliw przy prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min

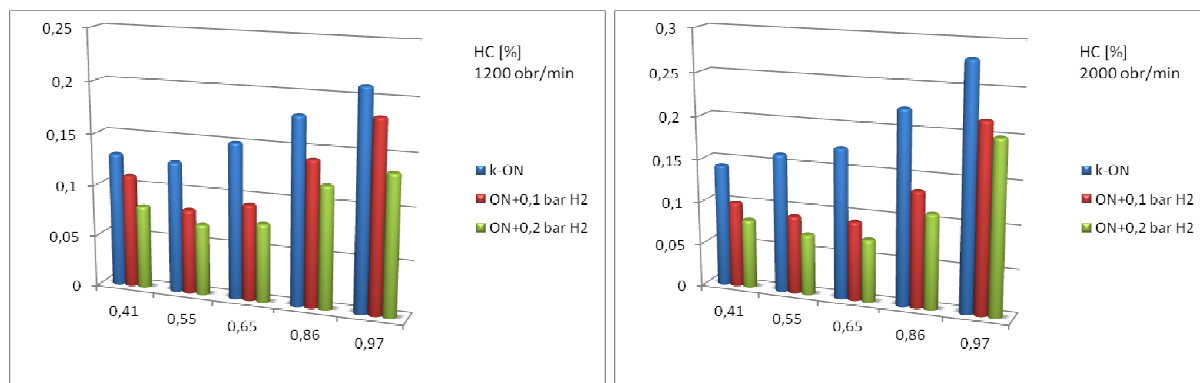
2000 obr/min	ON bez dodatku	ON+0,1 bar H <sub>2</sub>	ON+0,2 bar H <sub>2</sub>	ON bez dodatku	ON+0,1 bar H <sub>2</sub>	ON+0,2 bar H <sub>2</sub>
<b>t [ms]</b>	<b>NOx [ppm]</b>			<b>CO [ppm]</b>		
0,41	443	568	598	416,5	276	128
0,55	536	687	729	571,5	336	218
0,65	576	758	791	972,5	574	467
0,86	591	848	886	1458,5	1241	798
0,97	628	953	1093	1980	1612	1310
	<b>HC [%]</b>			<b>D [jB]</b>		
0,41	0,1429	0,1	0,081	3,88	2	1,65
0,55	0,1615	0,091	0,071	4,48	2,4	1,86
0,65	0,1743	0,092	0,073	5,82	2,5	2,31
0,86	0,2238	0,134	0,11	7,71	3,88	4,02
0,97	0,2808	0,217	0,2	8,6	6,1	5,01



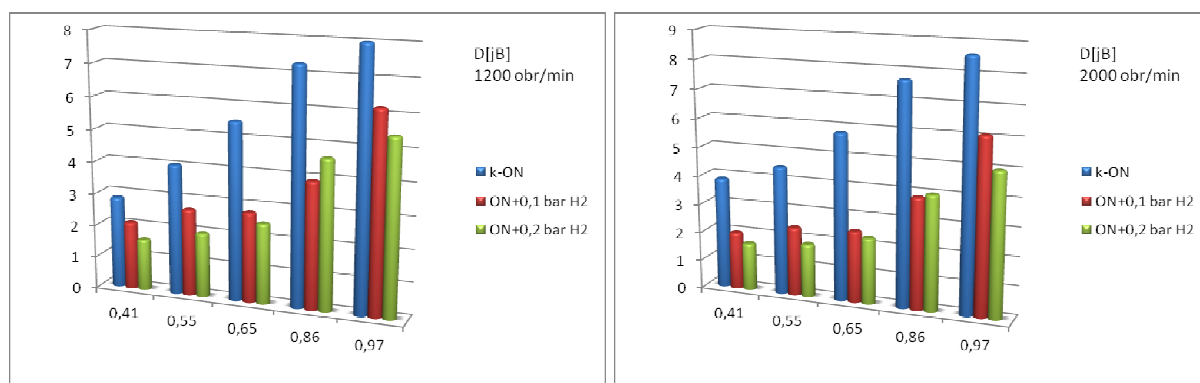
**Rys. 2.2.** Wykres stężenia NOx dla prędkości obrotowej 1200 i 2000 obr/min



**Rys. 2.3.** Wykres stężenia CO dla prędkości obrotowej 1200 i 2000 obr/min



Rys. 2.4. Wykres stężenia HC dla prędkości obrotowej 1200 i 2000 obr/min



Rys. 2.5. Wykres zadymienia spalin dla prędkości obrotowej 1200 i 2000 obr/min

Prezentowane wyniki pozwalają ocenić wpływ dodatku wodoru do oleju napędowego przy różnej proporcji mieszaniny tych paliw na zmianę stężenia związków toksycznych zawartych w spalinach. Podczas badań pracował układ recyrkulacji spalin na poziomie 25%, a parametrem regulowanym był czas otwarcia wtryskiwacza.

Uzyskane wyniki badań świadczą o znacznym wpływie redukującym dodatku wodoru na stężenie związków szkodliwych. Analizując wyniki można zauważyć, że wraz ze wzrostem zawartości wodoru w paliwie stężenie tlenu węgla maleje i dla najbogatszej mieszaniny oleju napędowego z wodorem otrzymano redukcję oscylującą około 60%. Podobny wpływ dodatku wodoru na emisję związków toksycznych można odnotować w przypadku węglowodorów HC, których zawartość w spalinach zmniejszyła się od 15% do 55% w zależności od czasu otwarcia wtryskiwacza. Zmniejszeniu uległo także zadymienia spalin, którego obniżenie wahało się w granicach 30 – 60 % w stosunku do emisji silnika w którym spalano paliwo bez dodatku wodoru. W przypadku  $\text{NO}_x$  zauważyć można wzrost emisji tego związku toksycznego, przy współspalaniu wodoru z paliwem konwencjonalnym z 0,1 bar  $\text{H}_2$  dodatku wodoru oraz 0,2 bar  $\text{H}_2$ . Rosnąca emisja tlenków azotu dla obu przypadków prędkości obrotowej jest w pełni uzasadniona zwiększającą się temperaturą w komorze spalania pomimo użycia systemu recyrkulacji spalin na poziomie 25%, gdzie widać, iż wzrost emisji jest znaczący. Przy czasie wtrysku równym 0,55 ms, i przy dodatku wodoru 0,1 bar przy prędkości obrotowej 1200 obr/min wzrost emisji  $\text{NO}_x$  wynosi 19% (i był to najmniejszy procentowy przyrost stężenia tego związku), natomiast dla czasu wtrysku 0,97 ms, i przy dodatku wodoru 0,2 bar zanotowano wzrost emisji tego związku na poziomie 84 % (co stanowiło największy przyrost stężenia zawartości tego związku w spalinach).

## PODSUMOWANIE

Paliwem, które ma spełnić w przyszłości rygorystyczne normy emisji związków toksycznych z silników ZS jest zaprezentowany w pracy wodór dający teoretycznie podczas

spalania wodę, z której ponownie można go odzyskać. Pomimo faktu, że bardzo trudnym jest spalanie go w czystej formie, to współspalanie go z olejem napędowym daje zadawalające rezultaty. Z przeglądu literatury jak i przeprowadzonych badań można wnioskować o znaczącym redukującym wpływie dodatku wodoru na stężenie emitowanych związków szkodliwych spalin. Zaletą transportowania wodoru do komory spalania za pośrednictwem oleju napędowego jest również możliwość stosowania konwencjonalnego układu dolotowego i recyrkulacji spalin EGR bez obawy niekontrolowanego zapłonu spowodowanego zmianą warunków termodynamicznych panujących w kanale dolotowym. Spalanie wodoru mieszanego z konwencjonalnym paliwem powoduje, że ilość potrzebna do zapewnienia określonego zasięgu pojazdu jest mniejsza niż w przypadku czystego wodoru. Pozwala to na zmniejszenie koniecznej ilości wodoru magazynowanej w dodatkowym zbiorniku. W takim przypadku zastosowanie metod sorpcyjnych jest bardziej realne do użycia ich jako sposobu magazynowania wodoru, co dodatkowo zwiększa bezpieczeństwo eksploatowanego pojazdu. Wadą zastosowania współspalania jest niemożliwość wyeliminowania emisji związków węgla z racji obecności ich w konwencjonalnym paliwie. Jednak zaproponowane rozwiązanie zasilania silnika z zapłonem samoczynnym mieszanką dwupaliwową stwarza możliwość wykonania dodatkowej instalacji dla istniejących konstrukcji silników, co w rezultacie pozwala uzyskać spełnienie przez nie wyższych norm emisji, aniżeli tych do których zostały one zbudowane.

## BIBLIOGRAFIA

1. Białłozór S., Kupniewska A., *Elektrochemia stosowana w zarysie*. Politechnika Gdańska.
2. Idzior M., *Problem doboru wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym zasilanych paliwami alternatywnymi*. Politechnika Poznańska; Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczych w Radomiu, Poznań – Radom 2012.
3. Kozak W.: *Fizykochemiczne podstawy regulacji i sterowania silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2011.
4. McWilliam L., Megaritis T., Zhao H., *Experimental Investigation of the Effects of Combined Hydrogen and Diesel Combustion on the Emissions of a HSDI Diesel Engine*. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2008-01-1787.
5. Merkiś J., Pielecha I., *Alternatywne napędy pojazdów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2006.
6. Saravanan N., Nagarajan G., Dhanasekaran C., Kalaiselvan K. M., *Experimental Investigation of Hydrogen Fuel Injection in DI Dual Fuel Diesel Engine*. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2007-01-1465.
7. Sugała J., *Wodór jako paliwo*. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2008.
8. Szwaja S., *Studium pulsacji ciśnienia spalania w tłokowym silniku spalinowym zasilanym wodorem*. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
9. Szwaja S., *Hydrogen rich gases combustion in the IC Engine*. Journal of Kones – Powertrain and Transport, Warsaw 2009, Vol.16, No.4, 447 – 455.
10. Verhelst S., Sierens R., Verstraeten S., *A Critical Review of Experimental Research on Hydrogen Fueled SI Engines*. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2006-01-0430.

# PROGRESS PERSPECTIVE OF INDICATORS OF ENGINE DIESEL OIL RESEARCH SUPPLIED WITH A TOUCH OF HYDROGEN

## *Abstract*

*The work consists of two parts. The first presents the theoretical issues about hydrogen as an alternative fuel for use in compression ignition engine. The second part is an analysis of the results of co-combustion of hydrogen dissolved in diesel fuel. This study was to evaluate the effect of the addition of hydrogen to the concentration of toxic compounds emitted by the engine research. The study was conducted in three variants. The first option was the benchmark for the rest of the results and was carried out on the engine with diesel-powered. In the second and third variant it was delivered to the engine oil solution of hydrogen introduced into the mixer at a pressure of 0.1 bar and 0.2 bar overpressure.*

## **Autorzy:**

mgr inż. **Paweł Daszkiewicz** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, pawel.daszkiewicz@doctorate.put.poznan.pl

prof. dr hab. inż. **Marek Idzior** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, marek.idzior@put.poznan.pl

dr. inż. **Maciej Bajerlein** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, maciej.bajerlein@put.poznan.pl

dr. inż. **Wojciech Karpiuk** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, wojciech.karpiuk@put.poznan.pl