

## Theoretical analysis of a hydrogen support for the combustion in an automotive engine

*Abstract: This paper presents the results of the modelling of the combustion of a gasoline and HHO mixture in SI engines. HHO stands for a hydrogen and oxygen mixture which is a product of the operation of an electrolyser mounted in a vehicle. The engine model was based on a real object, i.e. Holden C20LE. It is a 4-cylinder, 4-stroke engine of 2 dm<sup>3</sup> displacement. The modelling was conducted using the AVL BOOST software and based on the previously developed zero-dimensional engine model. 10 different values of the composition of the combustible mixture were tested. The analysis focused on mean indicated pressure, volumetric efficiency, and the course of heat emission. Also, the performances of the engine fueled by gasoline and a mixture composed of 90% of gasoline and 10% of HHO were compared.*

Key words: hydrogen, a combustion engine, modelling, a zero-dimensional model.

### Analiza teoretyczna wodorowego wspomaganie spalania w silniku samochodowym

*Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań modelowych procesu spalania mieszaniny benzyny oraz HHO w silniku o zapłonie iskrowym. Przez oznaczenie HHO należy rozumieć mieszaninę wodoru i tlenu, będącą produktem działania elektrolizera znajdującego się na pokładzie pojazdu. Model silnika został oparty na rzeczywistym obiekcie o nazwie Holden C20LE. Jest to czterocylindrowy, czterosurowy silnik o pojemności skokowej równej 2 dm<sup>3</sup>. Badanie modelowe przeprowadzono w programie AVL BOOST, w oparciu o również wcześniej opracowano zero-wymiarowy model silnika. Przebadano 10 różnych wartości składu mieszaniny palnej. Analizie poddano średnie ciśnienie indykowane, sprawność wolumetryczną oraz przebieg wydzielania się ciepła. Porównano również osiągi silnika zasilanego benzyną oraz zasilanego mieszaniną składającą się 90% benzyny i 10% HHO.*

Słowa kluczowe: wodór, silnik spalinowy, modelowanie, model zero-wymiarowy

### 1. Wstęp

Wodór jako paliwo silnikowe ma wiele właściwości, które mogą przyczynić się do zwiększenia sprawności procesu spalania i obniżenia ilości toksycznych składników spalin silników o zapłonie iskrowym. Wodór charakteryzuje się wyższą temperaturą samozapłonu (około 858 K) [1]. Dodatkowo lepkość kinematyczna spalania płomienia wodoru wynosi 0,61 cm<sup>2</sup>/s i jest około cztery razy większa niż benzyny (0,16 cm<sup>2</sup>/s). Właściwość taka poprawia proces mieszania się paliwa z powietrzem i dodatkowo pomaga osiągnąć mieszaninę homogeniczną w cylindrze. Adiabatywna prędkość spalania wodoru wynosi 237 cm/s i jest pięć razy większa niż benzyny (42 cm/s), co może prowadzić do większej stabilizacji procesu spalania. Ze względu na większą prędkość spalania wodoru, krzywa spalania jest o wiele bliższa idealnej, co powoduje podwyższenie sprawności termicznej [2]. Powoduje to niestety zwiększoną emisję NO<sub>x</sub>, co uniemożliwia zastosowanie tego rozwiązania w szerokiej

skali [3]. Silniki zasilane wodorem wytwarzają mniejszy moment obrotowy [4]. Dzieje się tak ponieważ gęstość energetyczna wodoru jest o wiele mniejsza niż benzyny. Lepszym rozwiązaniem wydaje się być zasilanie silników spalinowych paliwami węglowodorowymi i dostarczanie wodoru jako dodatku w małych ilościach. Takie rozwiązanie wykazuje pozytywne skutki [5], [6], [7].

Dodatkową zaletą silników zasilanych wodorem jest możliwość ich pracy w warunkach zasilania o wiele bardziej ubogą mieszkanką [8], ponieważ zakres palności mieszkanki wodoru w powietrzu wynosi 4,1-75%, czyli jest o wiele większy niż benzyny (1,5-7,6%).

W literaturze występują opracowania dotyczące badań wpływu dodatku wodoru opisujące efekty tego dodatku na czas trwania procesu spalania [9]. Innym ważnym aspektem w spalaniu paliwa węglowodorowego z dodatkiem wodoru jest poziom emisji związków toksycznych. Autorzy pracy [10] stwierdzili, że poziom emisji NO<sub>x</sub>, HC i CO zmniejszył się po dodaniu wodoru do silnika.

Autorzy pracy [11], którzy przedstawili badania wpływu dodatku wodoru na sprawność w silniku benzynowym o zapłonie iskrowym w warunkach pracy biegu jałowego i stechiometrycznej mieszance stwierdzili, że efektywne ciśnienie indykowania było stabilnie zredukowane podczas dozowania wodoru.

Dodatkowym aspektem stosowania dodatku HHO do benzyny jest zwiększenie udziału tlenu w mieszance. Jak wykazały badania prowadzone przez Argonne National Laboratory [5] kierowane przez University of Chicago potwierdziły spadek emisji CO, CO<sub>2</sub>, i HC w spalinach dzięki stosowaniu wzbogacenia powietrza w tlen w różnych warunkach obciążenia.

## 2. Metodyka badań

W literaturze naukowej można spotkać wiele pozycji opisujących modelowanie fizyczne silników [3], [12]. Można jednoznacznie stwierdzić, że zerowymiarowe modelowanie oparte o zasadę zachowania masy i zasadę zachowania energii w całym modelowanym elemencie jest znacznie szybsze niż modelowanie trójwymiarowe. Z tego też powodu autorzy postanowili użyć tej metody w oparciu o program AVL BOOST.

W celu przeprowadzenia badań modelowych spalania mieszanin benzynowo-wodorowo-powietrznych zmieniono masowe udziały paliwa wodorowego w cylindrze (Tab. 1). Ponieważ silnik zasilany był dodatkiem HHO przyjęto skład gazu generowanego przez elektrolizer w wartościach 33,33% tlenu i 66,66% wodoru. Badania zostały przeprowadzone dla warunków pełnego obciążenia silnika i dwóch wartości prędkości obrotowych 2500 i 5000 obr/min. Wyznaczono również charakterystykę zewnętrzną silnika dla dwóch skrajnych składów mieszaniny benzynowo-wodorowej.

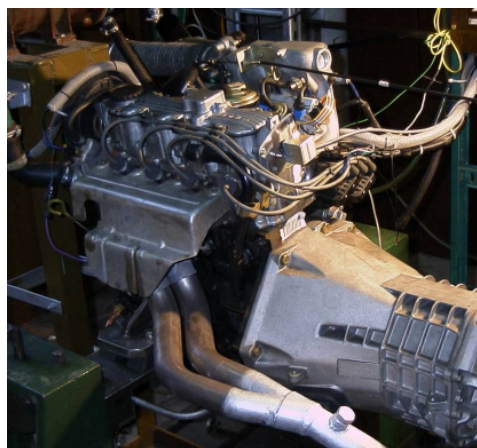
Tab. 1. Warianty składów masowych paliwa zasilającego silnik

Tab. 1. Mass compositions variations of engine fuel

Lp.	Benzyna	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
1	0,9	0,067	0,033
2	0,91	0,060	0,030
3	0,92	0,053	0,027
4	0,93	0,047	0,023
5	0,94	0,040	0,020
6	0,95	0,033	0,017
7	0,96	0,027	0,013
8	0,97	0,020	0,010
9	0,97	0,013	0,007
10	0,99	0,006	0,004

## 3. Obiekt badań

Obiektem badań był czterocylindrowy, czterosuwowy silnik w układzie rzędownym o oznaczeniu C20LE Holden, o pojemności 1998 cm<sup>3</sup> i stopniu sprężania 8,8:1 (rys.1). Obiekt ten wyposażony jest w wielopunktowy wtrysk benzyny do kolektora dolotowego. Niektóre dane techniczne silnika przedstawiono w tabeli 2. Natomiast czujniki i układy wykonawcze układu sterowania silnikiem zawiera tabela nr 3.



Rys. 1. Obiekt badań

Fig. 1. The object of research

Tab. 2. Dane techniczne silnika Holden

Tab. 2. Holden Engine Specifications

Producent	Holden
Kod silnika	C20LE
Model	2,0 MPFI
Rodzaj	4-suwowy z ZI
Liczba i układ cylindrów	4, rzędowny
Średnica cylindra/skok tłoka	86/86 mm
Pojemność skokowa	1998 cm <sup>3</sup>
Stopień sprężania	8,8:1
Max moc silnika	77 kW przy 5200 obr/min
Max moment obrotowy	164 Nm przy 2600 obr/min
Obroty biegu jałowego	800 ±50 obr/min
Kolejność pracy cylindrów	1-3-4-2
Rodzaj zapłonu	bezzrozdzielaczyowy moduł DIS

Tab. 3. Czujniki i układy wykonawcze układu sterowania silnikiem

Tab. 3. Sensors and implementing systems of motor control

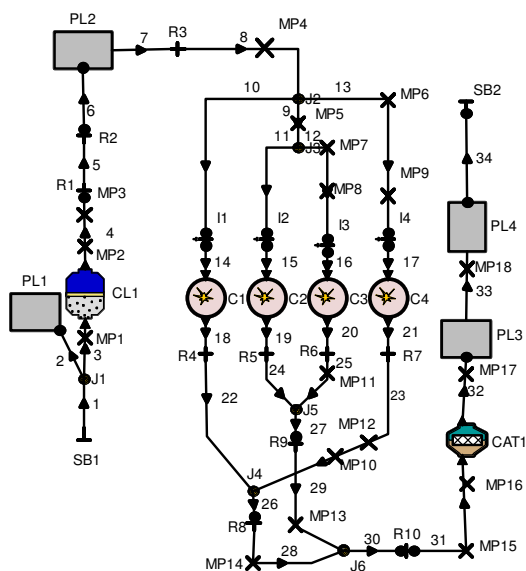
Czujniki pomiarowe	Układy wykonawcze
czujnik położenia wału korbowego	wtryskiwacze (4 szt.)
czujnik położenia przepustnicy	układ zapłonowy (DIS)
czujnik temperatury cieczy chłodzącej	pompa paliwa
czujnik temperatury w kolektorze dolotowym	silnik krokowy obejściowego zaworu powietrza
czujnik tlenu (sonda lambda)	
czujnik prędkości pojazdu (zamontowanego w skrzyni biegów)	

#### 4. Model silnika i zakres badań w programie AVL BOOST

Autorzy używając ww. oprogramowania zamodelowali obiekt opisany w punkcie 3, używając następujących elementów:

- układ dolotowy wraz z filtrem powietrza,
- cylindry,
- układ wylotowy wraz z katalitycznym układem oczyszczania spalin,
- wtryskiwacze benzyny.

W celu uzyskania mieszanki benzynowo-wodorowo-powietrznej wykorzystano funkcję, dzięki której możliwe jest ustalenie składu gazów w cylindrze. Kompletny model silnika przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Model silnika w programie AVL BOOST  
Fig. 2. Engine model in AVL BOOST software

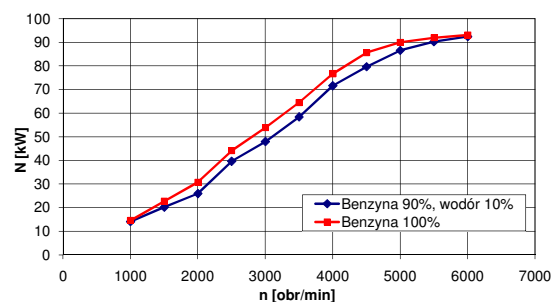
Ponieważ model silnika został wykonany z wykorzystaniem standardowych elementów dostępnych w bibliotekach oprogramowania, konieczne było dokonanie uproszczeń w jego konstrukcji, co przedstawia tabela nr 4.

Tab. 4. Elementy wykorzystane do budowy modelu  
Tab. 4. The parts used to build model

Nazwa	Funkcja	Oznaczenie	Ilość
System Boundary	Warunki brzegowe	SB	2
Restriction	Połączenie przewodów	R	10
Injector	Wtryskiwacz	I	4
Measuring Point	Punkt pomiarowy	MP	18
Air Cleaner	Filtr powietrza	AC	1
Cylinder	Cylinder	C	4
Plenum	Objętość	P	4
Connection	Przewód	-	34
Catalist	Katalizator	CAT	1

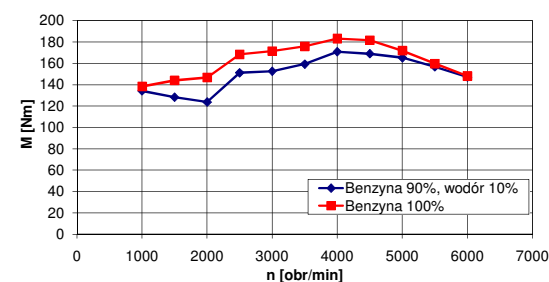
#### 5. Wyniki badań

Na rysunkach 3-5 przedstawiono wyniki badań silnika zasilanego mieszanką benzyny i HHO oraz benzyny. Wszystkie przedstawione zależności odnoszą się do pełnego obciążenia silnika.



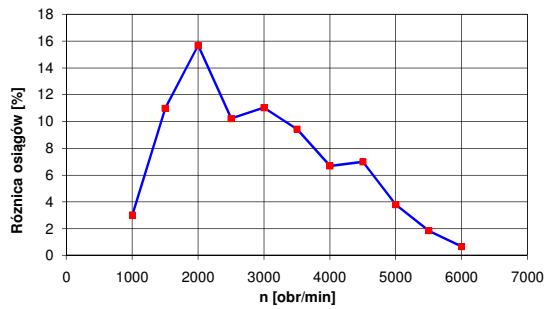
Rys. 3. Zależności mocy w funkcji prędkości obrotowej dla dwóch skrajnych składów mieszanki palnej

Fig. 3. Power on rotation speed for the two extreme compositions of fuel mixture



Rys. 4. Zależności momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej dla dwóch skrajnych składów mieszanki palnej

Fig. 4. Torque on rotation speed for two extreme compositions of fuel mixture



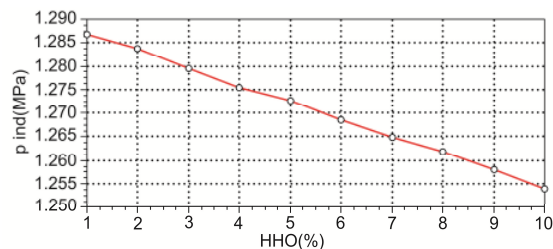
Rys. 5. Zależność zmniejszenia się osiągnięć silnika w funkcji prędkości obrotowej

Fig. 5. Reduction of engine performance on rotation speed

Na wykresie zależności pełnej mocy silnika dla dwóch analizowanych paliw (rys. 3) można zauważyć zmniejszenie wartości mocy, co jest spowodowane zasilaniem silnika mieszaniną wodoru i tlenu. Największa różnica występuje dla wartości 2000 obr/min, najmniejsza zaś dla 1000 i 6000 obr/min i wynosi około 3%. Podobnie przedstawia się zmiana momentu obrotowego (rys. 4).

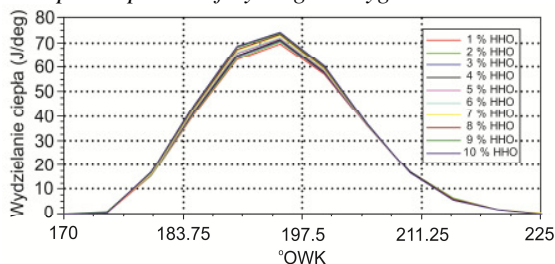
Przyczyną takiej tendencji jest zmiana sprawności wolumetrycznej badanego obiektu. Wartość sprawności napełniania jest największa dla prędkości obrotowej 4500 obr/min a najmniejsza dla 2000 obr/min.

Na rysunkach 6-9 przedstawiono wyniki badań modelowych silnika zasilanego różnymi składami mieszaniny palnej. Kolejne rysunki przedstawiają przebiegi średniego ciśnienia indykowanego, ciepła w komorze spalania oraz zależność stężenia dwutlenku węgla. Symulacje wykonano dla prędkości obrotowej 5000 obr/min.

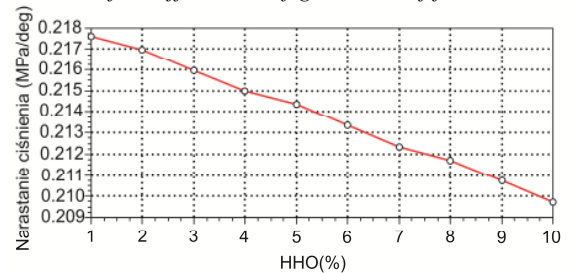


Rys. 6. Zależność średniego ciśnienia indykowanego od masowego udziału mieszaniny wodorowo-tlenowej

Fig. 6. Mean effective pressure on mass participation of hydrogen-oxygen mixture

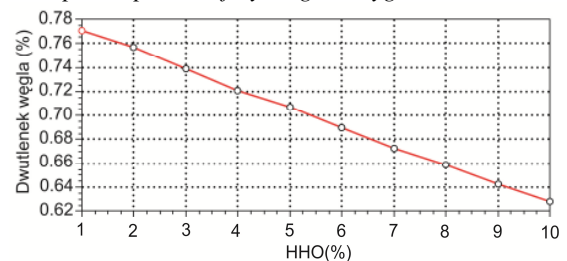


Rys. 7. Przebieg wydzielania ciepła w komorze spalania dla różnych składów mieszaniny palnej



Rys. 8. Zależność narastania ciśnienia w cylindrze od masowego udziału mieszaniny wodorowo-tlenowej

Fig. 8. Pressure rise in the cylinder on mass participation of hydrogen-oxygen mixture



Rys. 9. Zależność stężenia dwutlenku węgla w spalinach od masowego udziału mieszaniny wodorowo-tlenowej

Fig. 9. Carbon dioxide concentration in the exhaust gas on massive participation of hydrogen-oxygen mixture

Na rysunku 6 przedstawiono zmniejszającą się po dodaniu HHO wartość średniego ciśnienia indykowanego, o około 0,03 MPa. Natomiast na rysunku 7 przedstawiony jest przebieg wydzielania się ciepła. Można zauważyć, że zwiększenie udziału wodoru oraz tlenu w mieszaninie palnej powoduje zwiększenie ilości wydzielanego ciepła o około 6 J/°OWK. Natomiast zmniejsza się prędkość narastania ciśnienia w komorze spalania (rys. 8). Obliczenia pokazały obniżenie wartości o około 0,01 MPa/°OWK. Na rysunku 9 można zauważyć, że zwiększenie udziału masowego HHO powoduje obniżenie stężenia masowego dwutlenku węgla w spalinach. Zauważono zmniejszenie tej wartości o około 7%. Wynika to z faktu, że zmniejszył się udział masy węgla w paliwie, a dodatkowo dostarczony został tlen.

## 6. Wnioski

Wykonane badania modelowe procesu spalania mieszaniny benzynowo-wodorowo-powietrznej pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wprowadzenie do komory spalania mieszanek wodorowo-tlenowych znacząco wpływa na przebieg procesu spalania,

- wykazano pozytywny wpływ na skład spalin, w szczególności uzyskano obniżenie dwutlenku węgla oraz tlenków azotu,
- wykazano, że zwiększenie udziału wodoru oraz tlenu (mieszaniny HHO) w komorze spalania powoduje zmniejszenie średniego ciśnienia indukowanego,

- towarzyszy temu zmniejszenie osiągnięć silnika,
- stwierdzono również zmianę przebiegu wywiązywania się ciepła oraz prędkości narastania ciśnienia oraz przesunięcia występowania ciśnienia maksymalnego.

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

HHO mieszanina wodoru i tlenu, która jest produktem pracy elektrolizera/*hydrogen and*

*oxygen mixture which is a product of the operation of a electrolyse*

### Bibliography/Literatura

- [1] Das LM.: Hydrogen–oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1996;21:703–15.
- [2] Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J, Ding S.: Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008;33:823–31.
- [3] Leo D. J., Nelson D. J., Ellis W. M.: Model of the Air System Transients in a Fuel Cell Vehicle. Master of Science in Mechanical Engineering, Blackburg, Virginia 2002.
- [4] Ganeshb RH, Subramaniana V, Balasubramanianb V, Mallikarjuna JM, Ramesh A, Sharma RP.: Hydrogen fueled spark ignition engine with electronically controlled manifold injection: an experimental study. *Renewable Energy* 2008;33:1324–33.
- [5] Akansu SO, Kahraman N, Ceper B.: Experimental study on a spark ignition engine fuelled by methane–hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007, 32:4279–84.
- [6] Porpatham E, Ramesh A, Nagalingam B.: Effect of hydrogen addition on the performance of a biogas fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007;32:2057–65.
- [7] Liu B, Huang Z, Zeng K, et al.: Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends. *Energy and Fuels* 2008, 22:273–7.
- [8] 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: 1416–24.
- [9] Andrea TD, Henshaw PF, Ting DSK.: The addition of hydrogen to a gasoline –fuelled SI engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2004, 29:1541–52.
- [10] Li J, Guo L, Du T.: Formation and restraint of toxic emissions in hydrogen–gasoline mixture fueled engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 1998, 23:971–5.
- [11] Kahraman E, Ozcanl SC, Ozerdem B.: An experimental study on performance and emission characteristics of a hydrogen fuelled spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy* 2007, 32:2066–72.
- [12] Jerrelind J.: A Study in Model Based Control of an Evaporative Emission Management System. *Tekniska Högskolan in Linköping* 1998.

Mr Mirosław Wendeker, Prof. DSc., Ph.DEng. – head of the Department of Thermodynamics, Fluid Mechanics and Aviation Propulsion Systems, in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

*Prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker – kierownik Katedry Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.*



Mr Piotr Jakliński, PhD, Eng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

*Dr inż. Piotr Jakliński – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.*



<p>Mr Łukasz Grabowski, PhD, Eng. - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.</p> <p><i>Dr inż. Łukasz Grabowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej</i></p>		<p>Mr Konrad Pietrykowski, PhD, Eng. - doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.</p> <p><i>Dr inż. Konrad Pietrykowski – pracownik naukowy na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej</i></p>	
<p>Mr Rafał Sochaczewski, MSc, Eng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.</p> <p><i>mgr inż. Rafał Sochaczewski – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.</i></p>		<p>Mr Paweł Magryta, MSc, Eng. – post-graduate in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.</p> <p><i>mgr inż. Paweł Magryta – doktorant na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.</i></p>	