

Grzegorz KUBICA

## **BADANIA ROZWOJU I PRZEBIEGU PROCESU SPALANIA ALTERNATYWNYCH PALIW GAZOWYCH I ICH MIESZANEK Z WODOREM W SILNIKU ZI**

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono wyniki badania wpływu rodzaju paliwa na przebieg spalania w silniku ZI. Wyselekcjonowana grupa paliw obejmowała alternatywne paliwa gazowe: LPG, CNG oraz mieszanki metanu z wodorem i benzynę bezołowiową 95 jako paliwo bazowe. Obiektem badań był silnik ZI, oznaczony kodem X16SZR w samochodzie Opel Astra I. Przeprowadzone badania obejmują pomiary ciśnienia indykowanego na stanowisku hamownianym oraz szczegółową analizę przemian termodynamicznych, zachodzących w zamkniętej komorze spalania. Analizy składników bilansu energii dokonano wykorzystując program o nazwie „EnComTwo”, który realizuje założenia matematycznego modelu dwustrefowego. Analizie poddano poszczególne fazy procesu spalania ze szczególnym zwróceniem uwagi na takie aspekty, jak: zmiany ciśnienia indykowanego, przebieg wydzielania energii w trakcie spalania, długość procesu spalania i czas spalania ładunku.

## **AN INVESTIGATION OF INITIATION AND COURSE OF COMBUSTION PROCESS IN SI ENGINE FUELED WITH ALTERNATIVE GAS FUELS AND ITS HYDROGEN BLENDS**

**Summary.** The results of research an influence of fuel kind on combustion process in SI engine are presented in this paper. Selected fuels group include alternative gas fuels: LPG, CNG, hydrogen – CNG blends and unleaded gasoline 95 as a base fuel. SI engine X16SZR in Opel Astra I was investigated. The leaded tests include measurement results of dynamometer chassis test, as well as the detailed analysis of thermodynamic processes inside closed chamber. The application “EnComTwo”, which resolves assumptions of mathematical model, was used in analysing of engine thermal balance. Combustion process was investigated in each of individual phases: initiation, dynamical combustion and flame extinguish. The most important parameters were: indicated pressure, heat released, combustion duration and time of combustion.

### **1. WPROWADZENIE**

Wpływ rodzaju paliwa wykorzystywanego do zasilania silnika wymaga dokładnej analizy procesu spalania. Przebieg procesu spalania opisywany jest najczęściej dwoma parametrami. Pierwszy to stopień wypalenia ładunku  $x$  [%], który określa masowy udział spalonego

ładunku w stosunku do masy świeżego ładunku. Drugi parametr to ilość energii wyzwolonej wskutek spalania ładunku  $Q_b$  [kJ]. Wielkość ta jest wykorzystywana przede wszystkim w bilansie energii cyklu pracy silnika oraz przy porównywaniu procesów spalania paliw o różnych wartościach opałowych.

Jednym ze sposobów uchwycenia istotnych cech charakterystycznych dla spalania danego paliwa jest wykonanie badań symulacyjnych z wykorzystaniem modelu matematycznego. Cykl badań symulacyjnych zazwyczaj wykonywany jest w oparciu o zarejestrowany przebieg zmian ciśnienia indykowanego, rejestrowany w trakcie badań hamownianych. Pozwala to na uzyskanie takich istotnych informacji o procesie spalania, jak: początek i koniec spalania, szybkość wypalania ładunku i przebieg wywiązywania energii. Informacje te dają możliwość do wykonania dalszych, bardziej szczegółowych analiz tematyzacji temperatury gazów wewnątrz cylindra oraz powstawania i składu spalin. Istotnym punktem opracowania wyników jest również analiza poszczególnych etapów zachodzącego procesu spalania z wyodrębnieniem faz: inicjacji i rozpalania ( $x < 10\%$ ), spalania intensywnego ( $10\% < x < 90\%$ ), dopalania ( $x > 90\%$ ).

Określony zakres różnic w przebiegu spalania wskutek zmiany paliwa umożliwi w dalszej kolejności opracowanie i wprowadzenie odpowiednich zmian parametrów regulacyjnych w kierunku uzyskania optymalnych warunków pracy danego silnika.

## 2. ZAŁOŻENIA I OBIEKT BADAŃ

Badania przeprowadzono na silniku X16SZR w samochodzie Opel Astra [1]. Główne parametry konstrukcyjne silnika zestawiono w tabeli 1. Silnik ten, fabrycznie przystosowany do zasilania benzyną bezołowiową (Pł 95), wyposażono w dwa dodatkowe układy zasilania gazowymi paliwami alternatywnymi w postaci mieszanek propanu i butanu oraz gazu ziemnego z domieszkami wodoru.

Tabela 1

Charakterystyczne parametry silnika [1]

Typ	Cztery cylindry w układzie rzędownym
Objętość skokowa	1598 cm <sup>3</sup>
Średnica cylindra	79,0 mm
Skok tłoka	81,5 mm
Stopień sprężania	9,6
Kąt otwarcia zaworu wydechowego	41° przed DMP
Kąt zamknięcia zaworu wydechowego	11° po GMP
Kąt otwarcia zaworu ssącego	11° przed GMP
Kąt zamknięcia zaworu ssącego	41° po DMP

W trakcie badań prowadzonych na hamowni podwoziowej typu FLA 203, firmy Bosch rejestrowano ciśnienie indykowane w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Wykonano 6 serii pomiarowych wykorzystując do zasilania silnika następujące paliwa: benzynę bezołowiową (Pł 95), LPG, CNG oraz CNG z domieszkami wodoru w wielkości 5, 10 i 15%.

W serii dokonywano pomiarów w ustalonych warunkach pracy silnika:

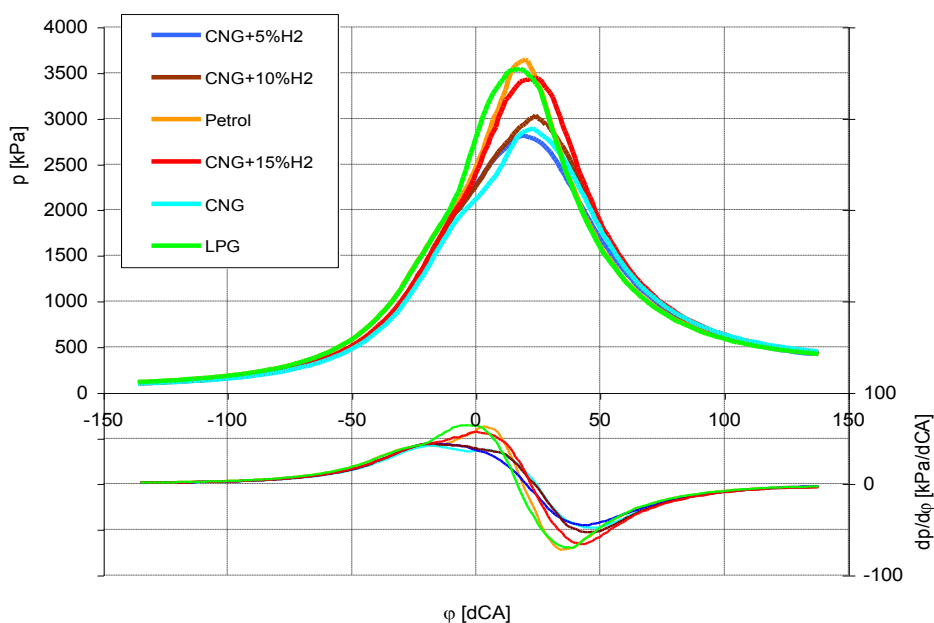
- na biegu jałowym,
- przy podwyższonych obrotach, bez obciążenia silnika,
- przy ustalonej prędkości obrotowej z pełnym obciążeniem.



Rys. 1. Samochód na hamowni. Widoczny zasobnik paliwa  
 Fig. 1. The car on dynamometer chassis. CNG container is visible

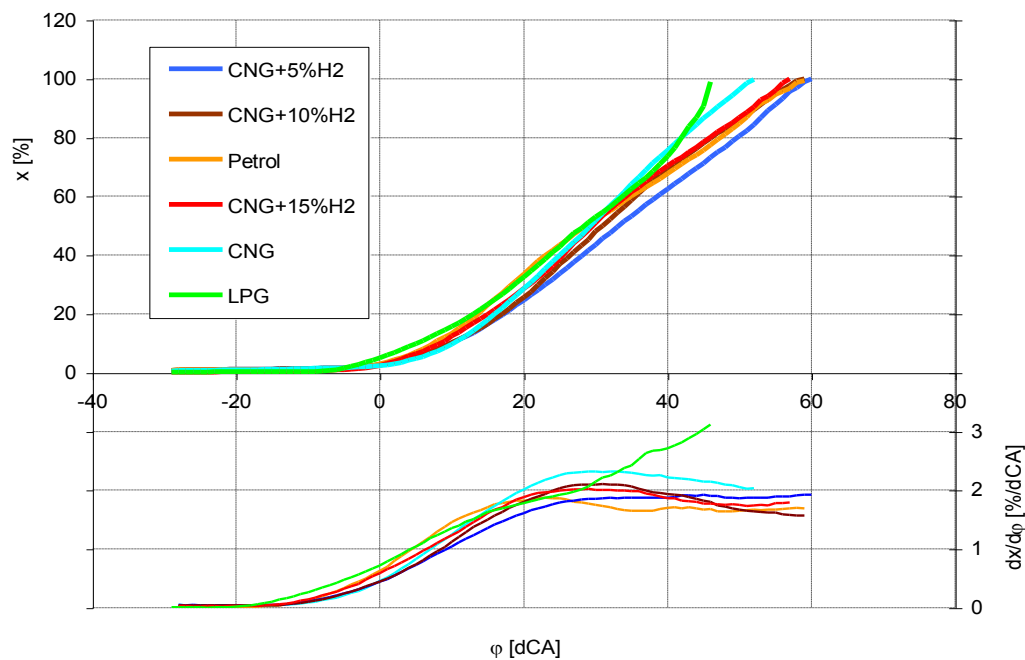
### 3. ZAKRES BADAŃ SYMULACYJNYCH

Wyjściowym parametrem jest przebieg ciśnienia indykowanego zarejestrowany w czasie badań na hamowni (rys. 2). W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano przebiegi m.in.: stopnia wypalenia ładunku  $x(\varphi)$  (rys. 3) oraz energii wyzwolonej w czasie spalania  $Q_b(\varphi)$  (rys. 4).



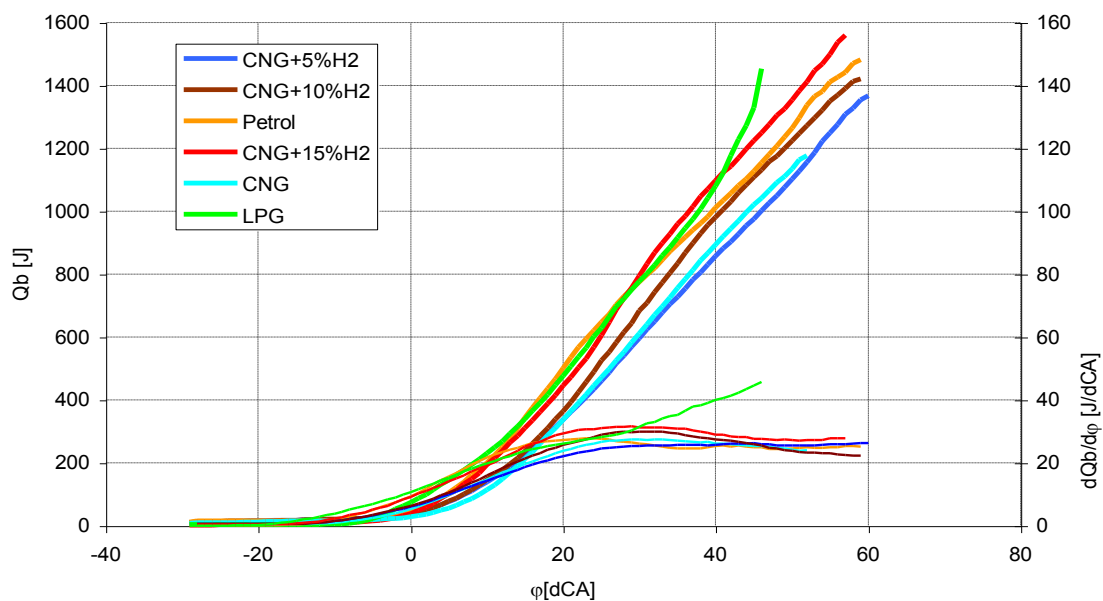
Rys. 2. Wykresy ciśnień i przyrostów ciśnień w zależności od rodzaju paliwa;  $n=2500$  obr/min; pełne obciążenie

Fig. 2. Indicated pressure and current increases profiles in depend on fuel kind;  $n=2500$  rpm; full loaded



Rys. 3. Stopień wypalenia ładunku i jego przyrosty w zależności od rodzaju paliwa;  $n=2500$  obr/min, pełne obciążenie

Fig. 3. Burned mass coefficient and current increases profiles in depend on fuel kind;  $n=2500$  rpm, full loaded



Rys. 4. Energia wyzwolona w czasie spalania i jej przyrosty w zależności od rodzaju paliwa;  $n=2500$  obr/min, pełne obciążenie

Fig. 4. Heat released during combustion and current increases profiles in depend on fuel kind;  $n=2500$  rpm, full loaded

## 4. FAZY SPALANIA ŁADUNKU

Dokonując analizy procesu spalania podzielono go na trzy fazy [...] w zależności od stopnia wypalenia ładunku  $x$ . Przyjęty podział zakłada występowanie faz: inicjacji i rozpalania ( $x < 10\%$ ), spalania intensywnego ( $10\% < x < 90\%$ ), dopalania ( $x > 90\%$ ). W pierwszej kolejności określono długość trwania poszczególnych faz w funkcji kąta obrotu wału korbowego  $\varphi$  [°OWK]. Obliczono również całkowity czas trwania spalania w zachodzącym cyklu pracy silnika  $t_b$  [ms] i porcje energii wyzwolone po spalaniu ładunku  $Q_b$  [J]. Uzyskane wyniki oraz wartości nastaw silnika zestawiono w formie tabelarycznej (tab. 2).

Tabela 2

Zestawienie wyników uzyskanych w całym zakresie badań procesu spalania

Paliwo	kWz [°OWK] przed ZZ	n [obr/min]	P <sub>max</sub> [kPa]	Q <sub>b</sub> [J]	t <sub>b</sub> [ms]	Δφ <sub>sp</sub> [°OWK]	Długość trwania faz spalania		
							x < 10%	10% < x < 90%	x > 90%
CNG	10	880	603	352,8	9,19	97	36	57	4
	35	4270	955	375,4	1,60	82	38	41	3
	30	1490	2113	1092,9	5,20	93	46	42	5
	30	2010	2683	1136,1	3,40	82	41	36	5
	30	2510	2798	1178,4	2,72	82	40	37	5
CNG+ 5% H	10	800	627	429,5	9,19	96	37	54	5
	35	4540	999	380,1	1,63	79	33	44	2
	30	1520	2253	1279,0	5,26	94	45	42	7
	30	2020	2869	1327,3	3,54	85	41	40	4
	30	2500	2810	1367,2	2,98	90	40	44	6
CNG+ 10% H	10	870	579	415,2	9,29	97	35	57	5
	35	4160	1175	425,1	1,70	85	34	48	3
	30	1490	2309	1263,8	5,53	99	46	47	6
	30	2000	2902	1307,5	3,87	93	40	47	6
	30	2510	3033	1419,8	2,95	89	40	42	7
CNG+ 15% H	10	870	570	442,6	8,33	87	33	50	4
	35	4010	1030	449,3	1,87	90	35	51	4
	30	1500	2633	1423,7	5,22	94	43	43	8
	30	2000	3252	1538,0	3,75	90	39	47	4
	30	2510	3442	1558,3	2,89	87	39	43	5
LPG	10	800	506	435,8	9,07	86	33	49	4
	35	4540	839	457,7	2,14	101	43	55	3
	30	1520	3016	1390,0	4,33	78	41	34	3
	30	2020	3326	1433,5	3,25	78	38	38	2
	30	2500	3455	1465,8	2,53	76	36	39	1
Benzyna Płb 95	10	790	919	420,5	5,94	57	15	40	2
	35	3940	1095	435,2	1,58	86	36	48	2
	30	1500	3332	1464,1	4,71	86	35	46	5
	30	2000	3648	1488,7	3,51	85	37	43	5
	30	2500	3643	1538,0	2,97	89	38	45	6

## 5. ENERGIA WYDZIELANA WSKUTEK SPALANIA ŁADUNKU

W dalszej kolejności przeanalizowano proces wydzielania energii. Całkowitą ilość energii oraz jej udziały w poszczególnych fazach spalania obliczono według wzoru:

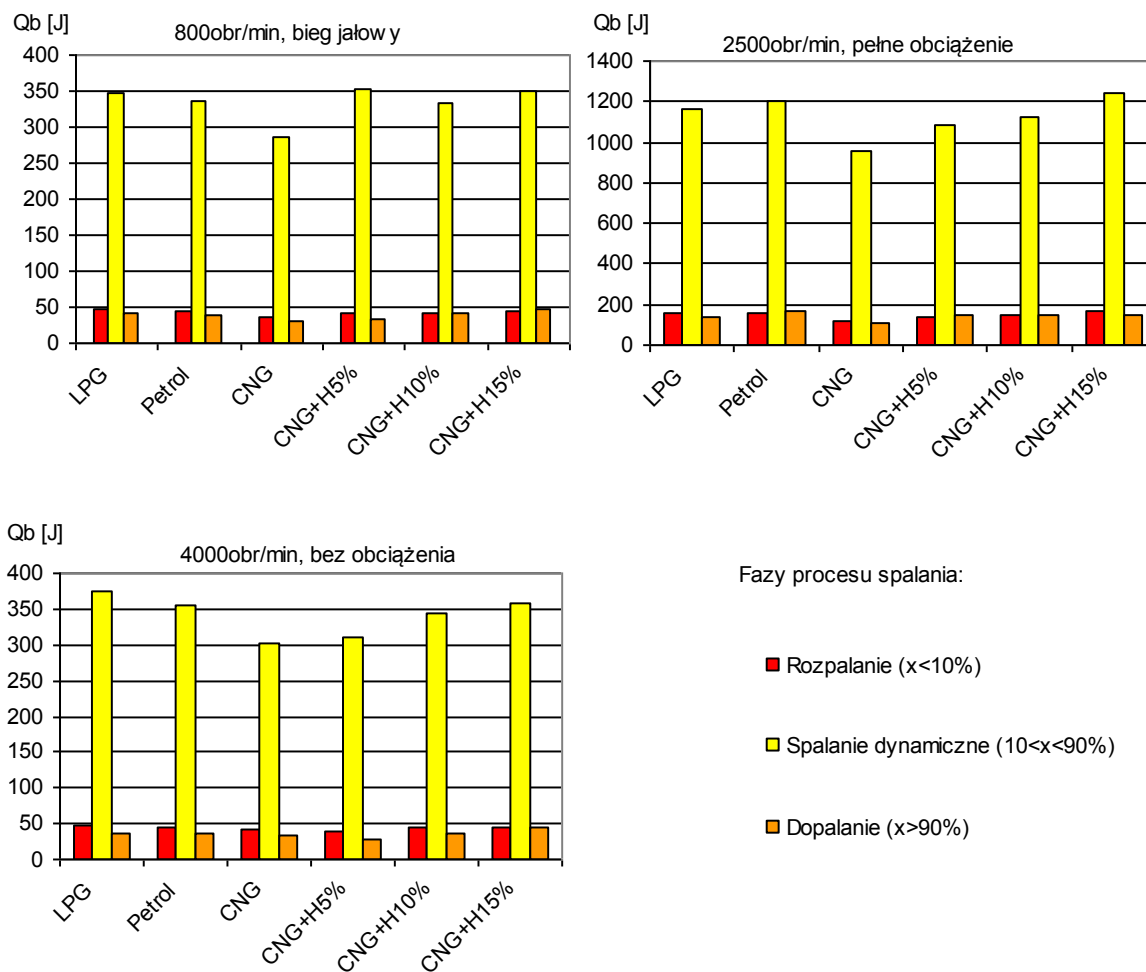
$$Q_b = x(\varphi) \cdot W_d \cdot m_u, [J]$$

gdzie:

$W_d$  – wartość opałowa mieszanki [J/kg];

$m_u$  – masa spalanego ładunku w cylindrze [kg].

Informacje te są szczególnie istotne w przypadku porównywania spalania z udziałem mieszanek paliwowych o różnych wartościach opałowych. Obraz rozkładu energii  $Q_b$  dla różnych warunków pracy silnika przedstawiono na wykresach (rys. 5).



Rys. 5. Porcje energii wyzwolonej w kolejnych fazach spalania, dla badanych paliw, w różnych warunkach pracy silnika

Fig. 5. Portions of energy released during each of individual combustion phase, for tested fuel kinds, in different working conditions

## 6. CZAS TRWANIA FAZ SPALANIA

Dokonując bezpośredniego porównania wyników badań prowadzonych przy różnych prędkościach obrotowych konieczne jest przedstawienie stopnia wypalenia ładunku  $x$  w funkcji czasu. Zależność, według której przelicza się okres trwania danej fazy spalania z jednostek  $^{\circ}OWK$  na  $ms$ , jest następująca:

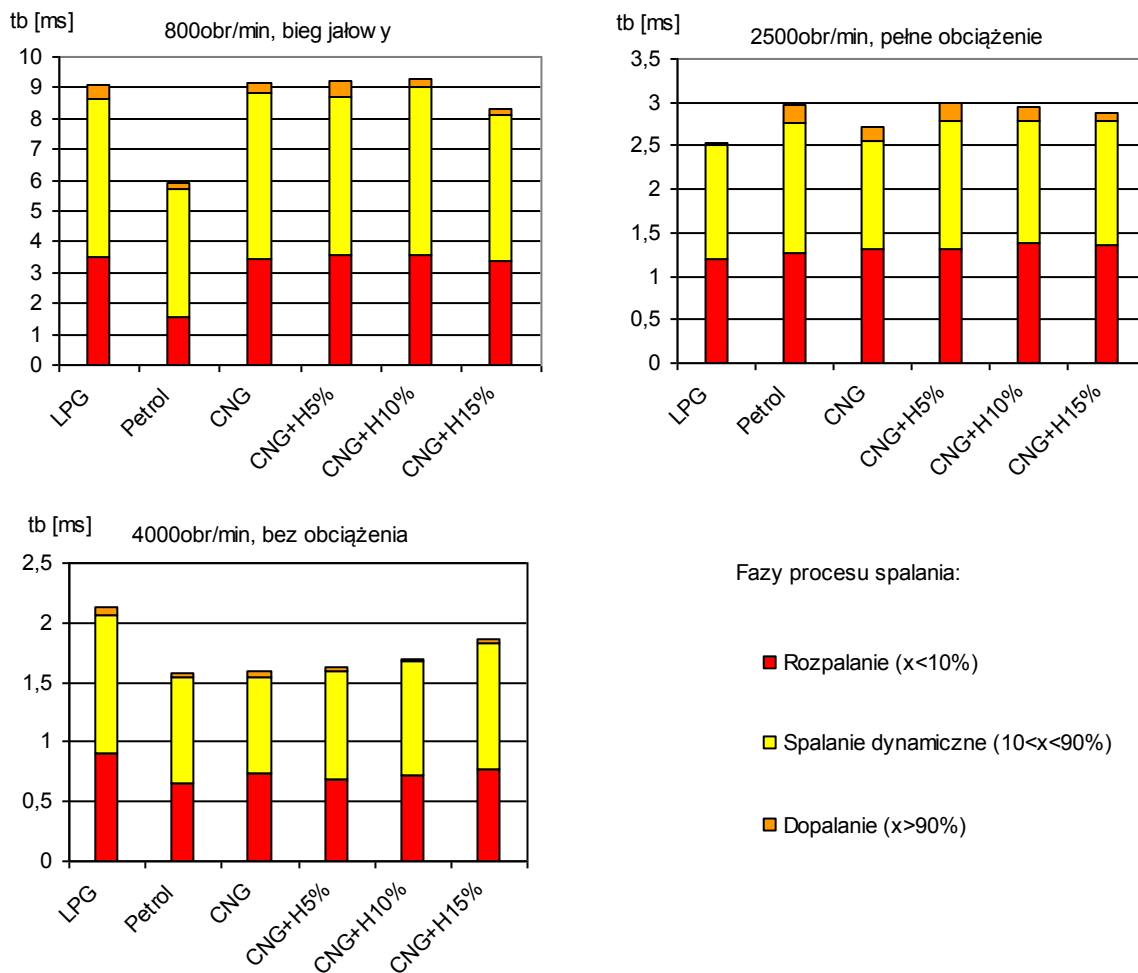
$$t = \frac{83,33 \cdot \Delta\varphi}{n}, [ms]$$

gdzie:

$\Delta\varphi$  – przedział kątowy obrotu wału korbowego [ $^{\circ}OWK$ ];

$n$  – prędkość obrotowa silnika [obr/min].

Analizując rozwój i przebieg procesu spalania przedstawiono na wykresach (rys. 6) udziały poszczególnych faz w całym procesie spalania ładunku w zależności od rodzaju badanego paliwa i warunków pracy silnika.



Rys. 6. Czas trwania całego procesu z podziałem na poszczególne fazy, dla badanych paliw, w różnych warunkach pracy silnika

Fig. 6. Time of duration complete process and each of individual phase, for tested fuel kinds, in different working conditions

## 7. WNIOSKI

Obserwacje poczynione w trakcie całego procesu badawczego oraz wyniki przeprowadzonych analiz można ująć w następujących wnioskach:

1. Wykorzystanie wszystkich spośród badanych paliw alternatywnych do zasilania silnika ZI jest możliwe i nie wymaga zmian konstrukcji silnika, poza wykonaniem niezbędnych prac adaptacyjnych w obrębie układu zasilania. Do zasilania paliwem CNG z domieszką  $H_2$  wykorzystuje się taki sam układ zasilania jak w przypadku czystego CNG.
2. Wprowadzenie domieszki  $H_2$  do metanu podwyższa wartość opałową mieszanki, co skutkuje wzrostem ilości energii uwalnianej w czasie spalania (rys. 5) i ostatecznie powoduje wzrost ciśnienia indykowanego (rys. 3). Przy udziale wodoru 15% obserwuje się przebiegi zbliżone jak przy spalaniu benzyny, bez korygowania nastaw regulacyjnych silnika.
3. Różnice w procesie spalania w odniesieniu do benzyny obserwowane są przede wszystkim na biegu jałowym, gdzie benzyna spala się znacznie szybciej. Przy pełnym obciążeniu silnika okres spalania ładunku mieści się w granicach 80-90 °OWK. Faza rozpalania mieszanki benzynowej jest krótsza w stosunku do pozostałych paliw średnio o ok. 5-8°OWK. Dla paliw gazowych faza ta ma charakter bardziej przewlekły (tab. 2).
4. Mieszanki na bazie LPG i CNG cechuje gwałtowniejszy przebieg w fazie spalania dynamicznego. Świadczą o tym wyższe wartości  $dx/d\varphi$  (rys. 3). Wprowadzenie domieszki  $H_2$  spowalnia przebieg spalania.
5. Dalsze badania w tym zakresie powinny zmierzać w kierunku uzyskania informacji na temat poziomu temperatury gazów w silniku oraz składu spalin. Istotne jest również określenie optymalnej wielkości domieszki  $H_2$  w CNG ze względu na warunki pracy i emisji badanego silnika ZI.

## Bibliografia

1. Etzold H. R.: Opel Astra. Sam naprawiam samochód. WKŁ, Warszawa 2003.
2. Flekiewicz M., Kubica G.: The practical verification of the mathematical model of gas engine powered by LPG. Proceedings of 8<sup>th</sup> European Automotive Congress, Bratislava 2001.
3. Flekiewicz M., Kubica G., Wilk K.: Określenie udziałów składników spalin w silniku zasilanym benzyną i paliwem gazowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, z. 26, Mechanika, Częstochowa 2006.
4. Maćkowski J., Wilk K.: The effect of the mixture and flame front initial temperature on the heat amount flowing between zones in the combustion engine. 12th international symposium on combustion processes, Bielsko Biała, Poland 1991.
5. Materiały firmy NATIONAL INSTRUMENTS – The Measurement and Automation Catalog, Austin TX, U.S. 2002.

Recenzent: Dr hab. inż. Sławomir Luft, prof. nzw. Politechniki Radomskiej