

Badania wstępne przebiegu ciśnienia w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym generatora prądotwórczego zasilanego syngazem, dla różnych kątów zapłonu.

Anna Janicka, Monika Magdziak – Tokłowicz Michał Rodak, Kamil Trzmiel, Radosław Włostowski, Maciej Zawiślak

Wroclaw University of Technology, Mechanical Department

W. Wyspianskiego 27, 50-370 Wroclaw, Poland

tel. 0048 71 320 26 00

e-mail: radoslaw.wlostowski@pwr.edu.pl

Gaz syntetyczny (syngaz) wyprodukowany z odpadów może zostać wykorzystany jako paliwo do tłokowego silnika spalinowego. Możliwości zastosowania syngazu jako samoistnego paliwa są jednak ograniczone. Projektowany układ transformacji energii zawartej w odpadach na prąd elektryczny będzie generował gaz składający się głównie z tlenku węgla, metanu, wodoru oraz dwutlenku węgla. Z dotychczasowych badań procesu zgazowania oraz przeglądu literaturowego ustalono iż, skład gazu jest zmienny w szerokim zakresie i zależy m.in. od jakości substancji poddanej zgazowaniu, temperatury procesu czy rodzaju medium zgazowującego. Zmienność składu gazu stanowi duże wyzwanie w kontekście efektywności energetycznej i trwałości mechanicznej zespołu prądotwórczego. Badania przeprowadzono na stanowisku umożliwiającym pomiar przebiegu ciśnienia w komorze spalania, przy dowolnym składzie podawanych gazów syntetycznych (mieszaniny jak i czyste gazy) wraz z możliwością korygowania parametrów układu zapłonowego. Wykazano, iż możliwe jest, przy odpowiedniej korekcie kąta zapłonu, spalanie mieszanin w szerokim zakresie zmienności poszczególnych składników.

1. Wprowadzenie

Kurczące zasoby oraz rosnące ceny konwencjonalnych paliw skłaniają do poszukiwania nowych źródeł energii. Obecnie możliwe jest pozyskanie energii odnawialnej z wiatru, energii słonecznej, wodnej, biomasy. Biomasa, przede wszystkim odpady organiczne poddane zgazowaniu, stanowi doskonały substytut paliw kopalnianych [1,2]. Gaz syntetyczny można wykorzystać do zasilania silnika spalinowego [1,2,3] natomiast silnik spalinowy stanowi bardzo dobre źródło energii mechanicznej oraz cieplnej niezbędnej w układach kogeneracyjnych. Możliwości zastosowania syngazu jako samoistnego paliwa są jednak ograniczone. Zgodnie z założeniami realizowanego projektu badawczego głównymi składnikami gazu syntetycznego zasilającego zespół prądotwórczy będą tlenek węgla, metan, wodór, oraz dwutlenek węgla. Gazy te posiadają skrajnie odmienne właściwości termodynamiczne oraz chemiczne. Zgodnie z dotychczas przeprowadzonymi oraz literaturą [1-7] można wykazać dużą zmienność składu gazu syntetycznego (tab. 1) a co za tym idzie zmienność cech paliwa takich jak wartość opałowa, kaloryczność, liczba metanowa.

	min. [% vol.]	max. [% vol.]
H ₂	5	56
CO	10	52
CO ₂	9	36

CH ₄	2	12
-----------------	---	----

Tab. 1. Składy minimalne i maksymalne poszczególnych składników syngazu

Zmienność składu w szerokim zakresie stwarza wyzwanie w zakresie optymalizacji nastaw silnika. Obecne badania skupiają się na poszukiwaniu optymalnego punktu zapłonu dla poszczególnych składów gazów.

2. Stanowisko badawcze

W celu przeprowadzenia badań zbudowano stanowisko badawcze w oparciu o zespół prądotwórczy PRAMAC S12000 wyposażony w silnik spalinowy o zapłonie iskrowym Honda GX 630. W tabeli 2. zestawiono podstawowe parametry silnika spalinowego.

Parameter	Value
Model	GX 630 20,8 KM
Engine type	four-stroke, two-cylinder, cooled with air
Type of cylinder	Steel made, V 90, OHV
Type of crankshaft	Horizontal
Cylinder capacity	688 cm ³
Diameter x stroke	78 x 72 mm
Compression ratio	9,3:1
Maximum power	15,5 kW (20,8 HP)/3500 rpm
Power handling	10,5 kW (14,1 HP)/3000 rpm
Maximum torque	48,3 Nm / 4,93 Kgm / 2500 rpm

Tab.2 Parametry techniczne silnika Honda GX630

Zespół prądotwórczy pierwotnie zasilany benzyną został zmodyfikowany i doposażony w niezbędną aparaturę umożliwiającą zasilanie gazem.

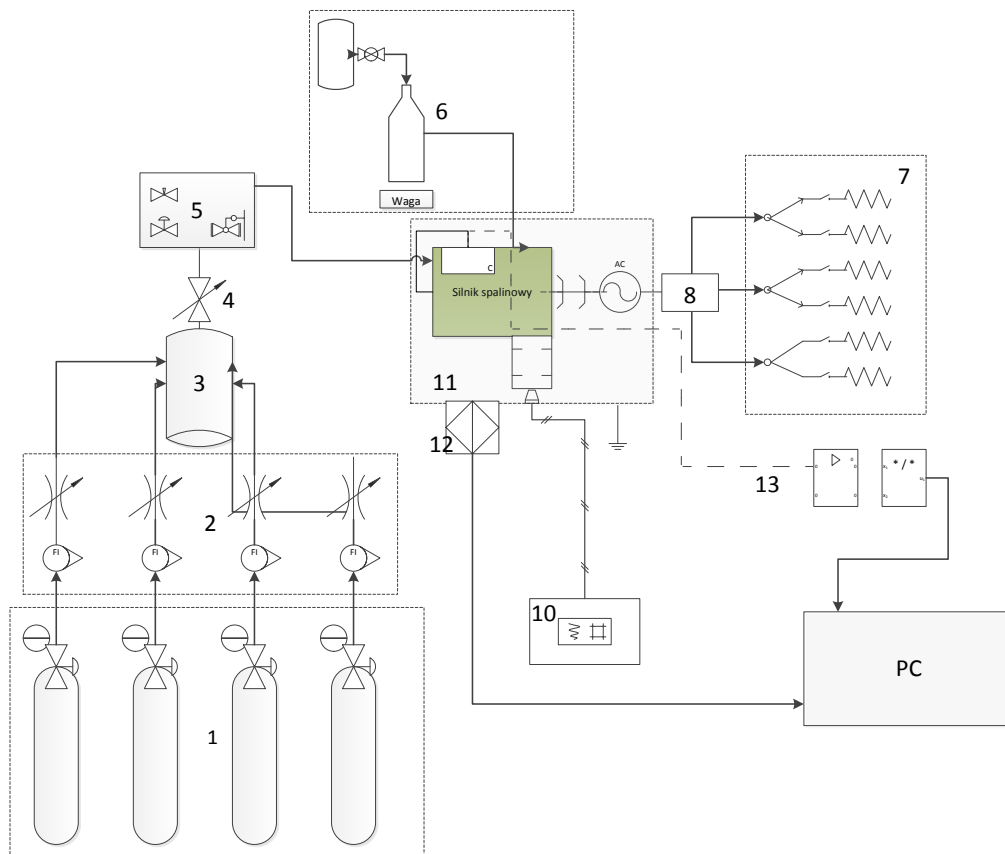


Fig. 2. Schemat stanowiska pomiarowego (opis w tekście)

Stanowisko pomiarowe składa się z silnika spalinowego połączonego z generatorem prądotwórczym (11, fig 2.). Układ zasilania benzynowy zmodyfikowano tak aby możliwy był pomiar zużycia paliwa. Pomiar zużycia benzyny (6) składa się ze zbiornika paliwa, zaworu odcinającego, naczynia pomiarowego (kolby) umieszczonego na wadze RADWAG WPE 4000. Dzięki temu możliwy jest ręczny pomiar zużycia paliwa metodą wagową.

Układ zasilania gazowego składa się z czterech butli gazowych (1) o pojemności wodnej 50 l. każda, z gazami technicznymi, wodór o czystości 5.0, metan o czystości 2.5, dwutlenek węgla o czystości 4.5 oraz tlenek węgla o czystości 1.8. Przy każdej butli umieszczony jest reduktor dwustopniowy o zakresie redukcji 0-4 bar. Następnie dla każdego gazu zastosowano oddzielny rotametr wraz z zaworem regulacyjnym (2) do pomiaru zużycia gazów. Z rotametrów gazy trafiają do mieszalnika (3) a następnie poprzez zawór odcinający (4) do parownika (5). Wykorzystano standardowy parownik LPG dla instalacji III generacji (z regulacją wydatku w funkcji podciśnienia w kolektorze dolotowym oraz regulacją napięcia sprężyny membrany parownika). Z parownika gaz, poprzez mieszalnik trafia do układu dolotowego.

Układ obciążający (7) generator stanowi zespół grzejników elektrycznych podłączonych do generatora przez miernik parametrów sieci Eastron 630 (8) umożliwiający odczyt rzeczywistego obciążenia elektrycznego układu prądotwórczego. Zespół grzejników został tak dobrany aby możliwe było obciążenie w pełnym zakresie pracy agregatu z rozdzielczością co 1 kW.

Aby umożliwić zmianę kąta zapłonu fabryczny układ zapłonowy zastąpiono układem elektronicznego zapłonu ze sterownikiem EMU firmy ECU Master umożliwiającym dowolną konfigurację zapłonu wraz z indywidualnymi cewkami zapłonowymi. Ze względu na przewidywane problemy z zapłonem niektórych z mieszanek zastosowano cewki o dużej energii iskry.

Układ do pomiaru ciśnienia w komorze spalania (13) składa się z enkodera Heidenhain ROD 426 3600 01 o rozdzielczości 7200 pkt. na obrót, umieszczonego współosiowo na wale

korbowym od stronu układu rozrządu, służącego do pomiaru chwilowego położenia wału korbowego, czujnika ciśnienia w komorze spalania Kistler typ 6117BFD16, zintegrowanego ze świecą zapłonową. Czujnik ciśnienia podłączony jest do wzmacniacza ładunkowego Kistler typ 5064C12 a następnie wraz z enkoderem poprzez platformę pomiarową SMETec Combi do komputera PC umożliwiającą akwizycję przebiegów ciśnienia w pamięci komputera.

Stanowisko pomiarowe wyposażone jest również w analizator spalin (10) MEXA 584L. Analizator był wykorzystywany, poza odczytem składu spalin, do ustawienia odpowiedniego składu mieszanki (współczynnik nadmiaru powietrza Lambda w zakresie 1-1.1 w zależności od mieszaniny).

3. Pomiary i wyniki badań

Na podstawie określonych granicznych udziałów poszczególnych gazów skomponowano kilkanaście mieszanin gazów (fig. 3), które przebadano pod kątem poprawności pracy oraz określono optymalne nastawy regulacji składu mieszanki dla obciążenia 6 kW.

W algorytmie badań przewidziano 5 punktów zapłonu (8.5, 11.5, 14.5 17.5, 20.5 °OWK przed ZZ) początkowe badania dla obniżonej mocy 4kW następnie zwiększając moc do zakładanej 6kW przebadano łącznie 4 mieszaniny otrzymując dla tychże mieszanin wykresy indykatorowe. Dwie mieszaniny zostały przebadane przy obciążeniu 4 kW. Pozostałe zgodnie z pierwotnie założonymi warunkami. Pomiar ciśnień następował po ustabilizowaniu się cieplnym silnika (2 min. w danym punkcie pracy) zgodnie z wytycznymi ujętymi w normach oraz literaturze. [7,8].

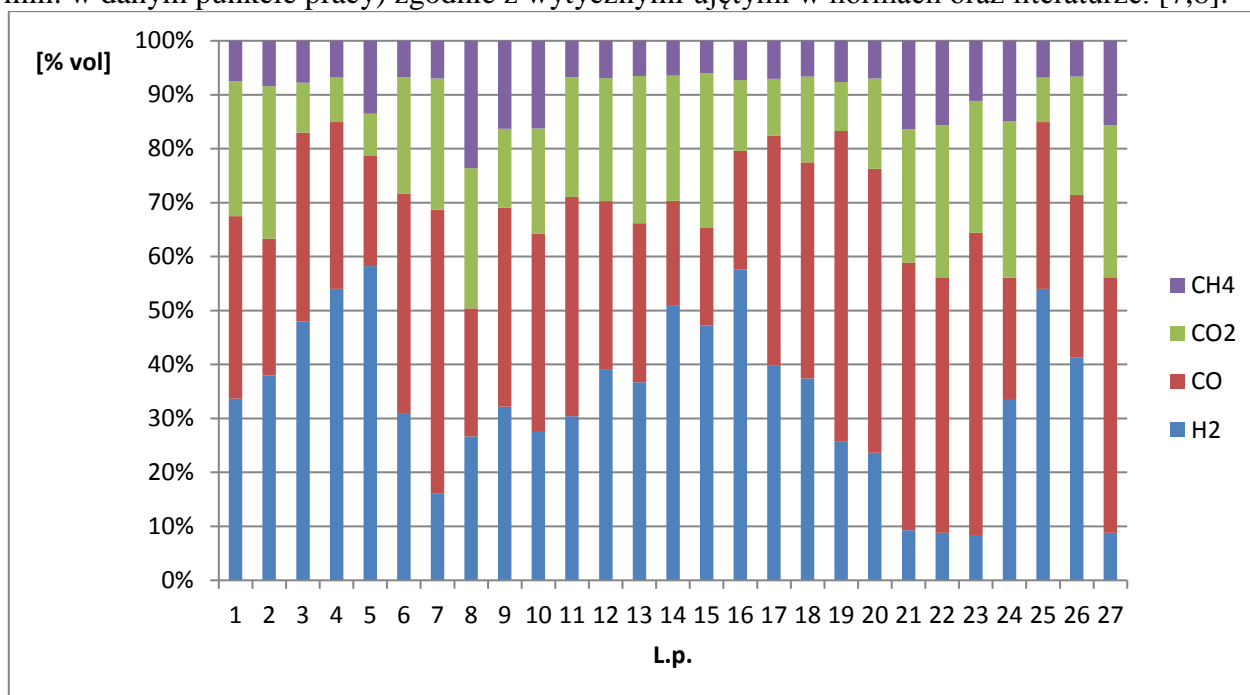


Fig. 3 Udział procentowy poszczególnych gazów w skomponowanych mieszaninach

Zapisywano 30 kolejnych cykli pracy, przeprowadzono analizę zmienności punktów maksymalnych ciśnień dla poszczególnych kątów zapłonu oraz wyznaczono średnie przebiegi ciśnień z 30 cykli pracy. Dane zestawiono w tabeli

nr miesz.	kąt zapłonu	śr. P max [bar]	odchyl. Std	Kąt OWK P max	odchyl. Std
19	8,5	42,37	3,83	22,27	5,48
	11,5	48,35	3,26	17,88	4,74

	14,5	50,63	2,86	16,48	4,62
	17,5	55,74	2,72	12,27	2,35
	20,5	59,47	2,14	10,45	2,22
20	8,5	34,88	1,9	10,72	12,56
	11,5	31,89	2,56	16,23	12,11
	14,5	36,87	4,93	20,44	9,8
	17,5	37,33	4,75	17,9	9,6
	20,5	43,65	4,23	14,89	6,36
21	8,5	27,06	2,47	24,81	5,1
	11,5	28,8	2,28	22,92	5,6
	14,5	33	2,4	21,82	3,59
	17,5	30,75	2,34	20,24	5,64
	20,5	33,23	2,36	18,5	3,44
22	8,5	26,16	2,11	24,74	10,9
	11,5	28,79	2,54	23,56	8,34
	14,5	30,92	2,98	24,58	7,11
	17,5	33,92	2,73	21,65	4,4
	20,5	35,68	3,29	17,4	5,68

Tab. 3 Zestawienie maksymalnych ciśnień spalania oraz kątów maksymalnych ciśnień wraz z odchyleniem standardowym

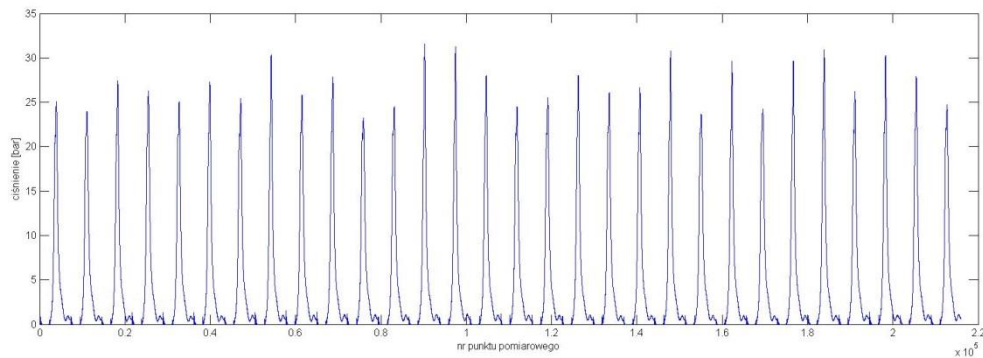


Fig.4 Przykładowy przebieg ciśnień dla 30 cykli pracy (mieszanina nr 21)

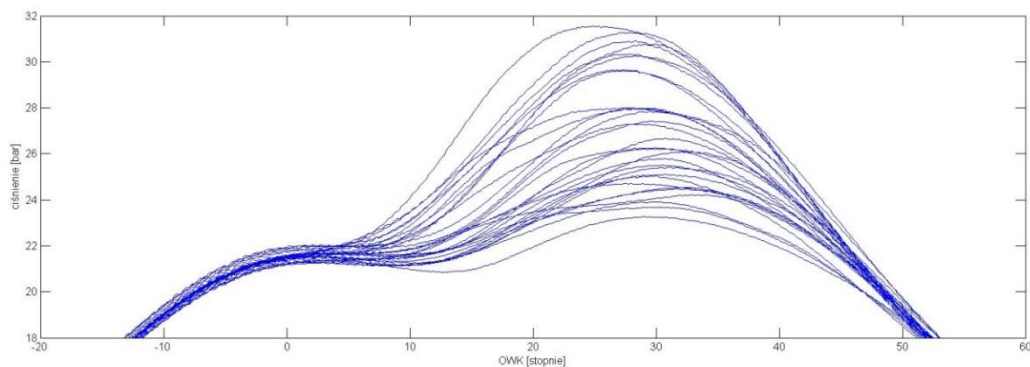


Fig 5 Przykładowy rozrzut ciśnień dla 30 cykli pracy (mieszanina nr 21)

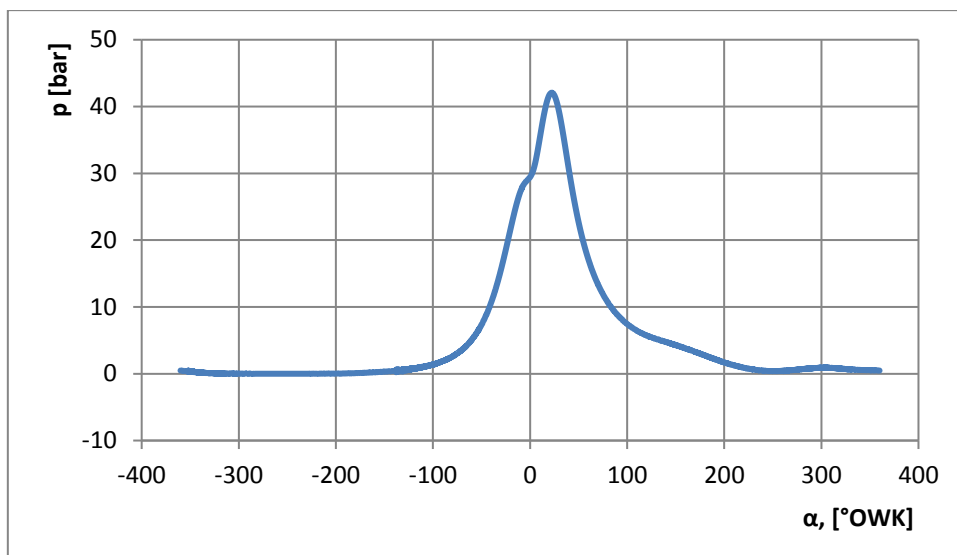
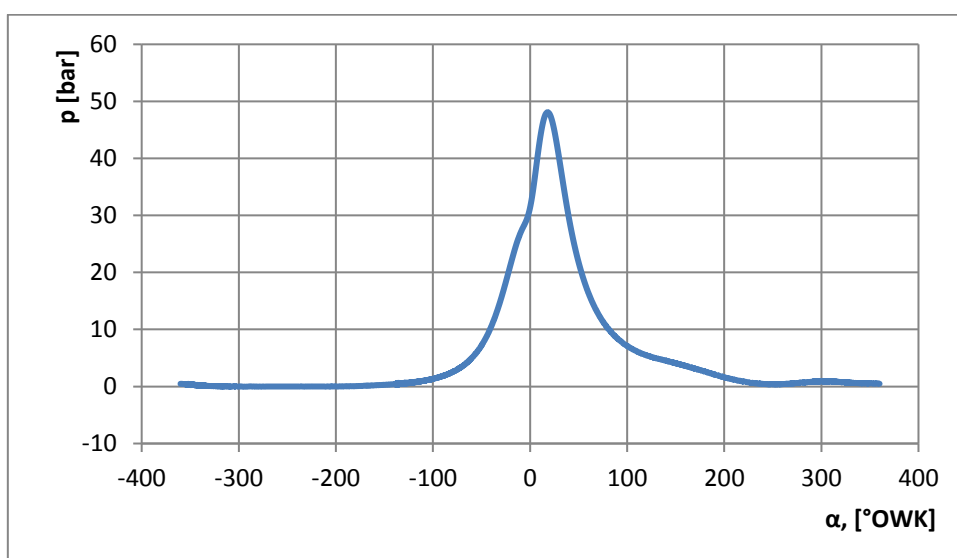
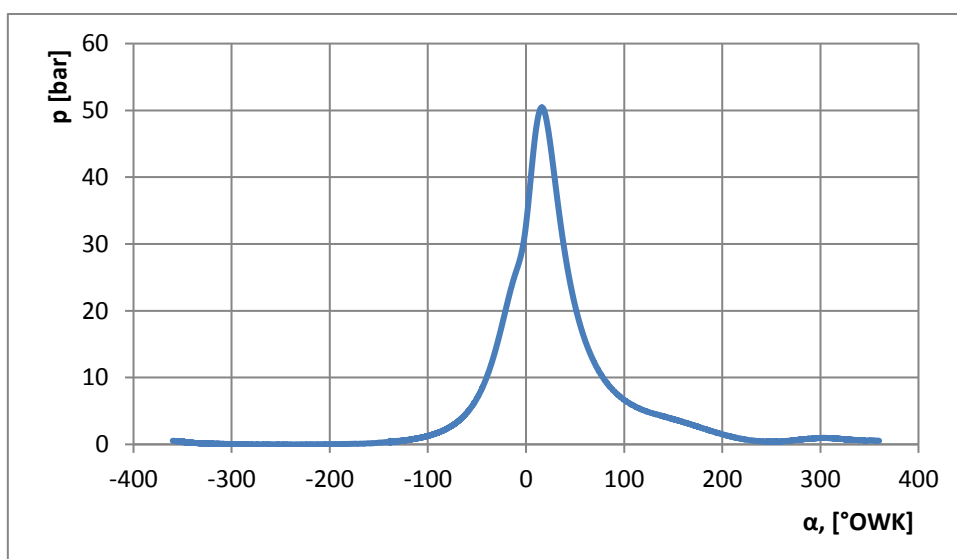


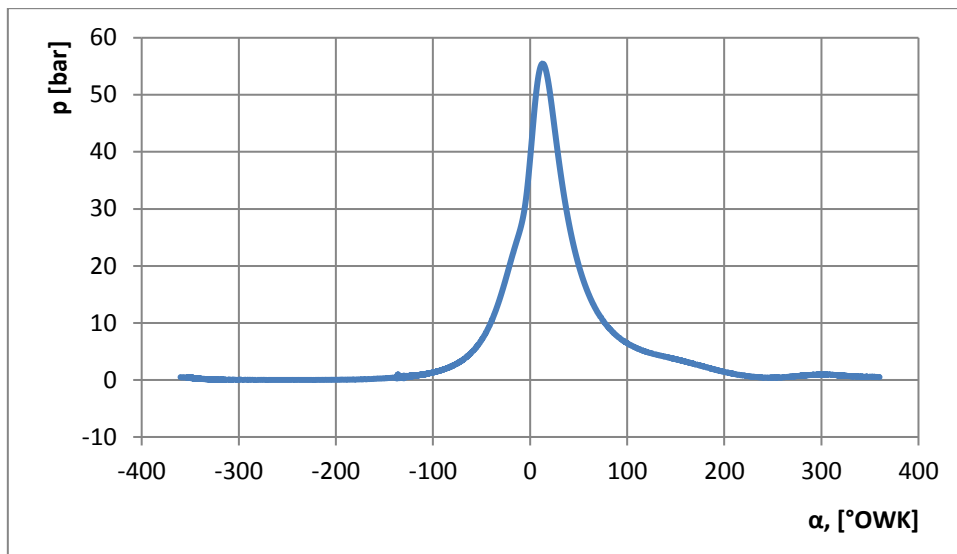
Fig. 6 Uśredniony (30 cykli) przebieg ciśnienia w komorze spalania dla mieszanki nr 19, kąt zapłonu $8,5^\circ$ przed ZZ



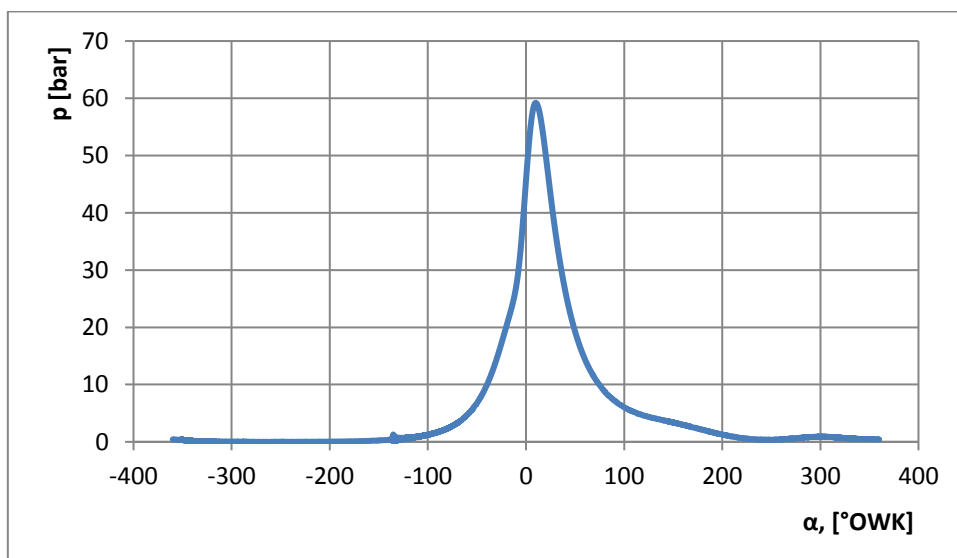
Wykres 18 Uśredniony (30 cykli) przebieg ciśnienia w komorze spalania dla mieszanki nr 19, kąt zapłonu $11,5^\circ$ przed ZZ



Wykres 19 Uśredniony (30 cykli) przebieg ciśnienia w komorze spalania dla mieszanki nr 19, kąt zapłonu $14,5^\circ$ przed ZZ



Wykres 20 Uśredniony (30 cykli) przebieg ciśnienia w komorze spalania dla mieszanki nr 19, kąt zapłonu $17,5^\circ$ przed ZZ



Wykres 21 Uśredniony (30 cykli) przebieg ciśnienia w komorze spalania dla mieszanki nr 19, kąt zapłonu 20° przed ZZ

4. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników sporządzono następujące wnioski:

- Wykorzystanie przebadanych paliw gazowych wymaga korekcji kąta zapłonu względem pierwotnych nastaw dla benzyny lub zastosowania układu dostosowującego kąt zapłonu do składu gazu, co wymaga dalszych badań przy wykorzystaniu pomiaru hałasu i/lub drgań.
- Przy zastosowaniu optymalnego kąta zapłonu, maksymalne ciśnienie spalania występuje w okolicach 20° OWK
- W silnikach wykorzystujących paliwa z udziałem wodoru konieczne może być zastosowanie dodatkowych układów odpowietrzających skrzynię korbową, zwłaszcza wymagane jest przewietrzanie górnych przestrzeni silnika. Silnik Honda GX630 fabrycznie posiada otwory przewietrzające wyłącznie w bloku silnika. Spowodowało to zbieranie się

wodoru w pokrywach zaworu co skutkowało niekontrolowanymi wybuchami gazów w skrzyni korbowej. Zjawisko nie występowało przy udziale wodoru poniżej 20 %.

- Wykazano, iż możliwe jest spalanie mieszanek o ponad 50 % udziale tlenu węgla oraz ponad 50 % udziale wodoru podając paliwo pośrednio do kolektora dolotowego.
- Przy optymalnych kątach zapłonu wykres przebiegu ciśnienia charakteryzuje się punktem przegięcia w okolicach zwrotu zewnętrznego. Powyższy fakt oraz stosunkowo późny kąt zapłonu wskazuje na znacząco szybszą prędkość spalania mieszanin gazowych.
- Zwiększenie zawartości tlenu węgla w gazie syntezowym skutecznie ogranicza maksymalne ciśnienia w komorze spalania.
- Należy rozważyć prawdopodobne problemy z rozruchem zimnego silnika na syngazie. Konieczne może okazać się wykorzystanie paliwa konwencjonalnego (benzyny bądź gazu ziemnego) obok układów zasilania w syngaz. Dodatkową korzyść stanowić będzie możliwość zwiększania kaloryczności paliwa podczas pracy zespołu prądotwórczego, zwiększając jednocześnie stabilność pracy. W dotychczasowych próbach zdarzało się, iż silnik nie był w stanie osiągnąć nominalnej prędkości obrotowej.
- Planuje się dalsze badania mieszanin gazowych w celu poszukiwania zależności pomiędzy składem gazu, kątem zapłonu a optymalnym przebiegiem procesu spalania.
- Podczas kolejnych analiz porównywane będą również zamknięte wykresy indykatorowe w układzie P-V.

References

- [1] Tsiakmakis S., Mertzis D., Dimaratos A., Toumasatos Z., Samaras Z. *Experimental study of combustion in a spark ignition engine operating with producer gas from various biomass feedstocks*. Fuel vol. 122, pp. 126–139, Elsevier 2014.
- [2] Homdoun N., Tippayawong N., Dussadee N., *Performance and emissions of a modified small engine operated on producer gas*. Energy Conversion and Management vol. 94, pp 286–292, Elsevier 2015.
- [3] Azimov U., Tomita E., Kawahara N., Harada Y., *Effect of syngas composition on combustion and exhaust emission characteristics in a pilot-ignited dual-fuel engine operated in PREMIER combustion mode*. International Journal of hydrogen energy vol. 36, pp. 11985-11996, Elsevier 2011.
- [4] Shivapuji A. M., Dasappa S., *In-cylinder investigations and analysis of a S I gas engine fuelled with H₂ and CO rich syngas fuel: Sensitivity analysis of combustion descriptors for engine diagnostics and control*. International Journal of Hydrogen Energy vol. 39, pp. 15786- 15802, Elsevier 2014.
- [5] Bhaduri S., Contino F., Jeanmart H., Breuer E., *The Effects of biomass syngas composition, moisture, tar loading and operating conditions on the combustion of a tar-tolerant HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engine*, Energy vol. 87, pp. 289- 302, Elsevier 2015.
- [6] Hyoseok Cha, Taejun Eom, Soonho Song, Kwang Min Chun, *An experimental study on the fuel conversion efficiency and NO_x emissions of a spark-ignition gas engine for power generation by fuel mixture of methane and model syngas (H₂ /CO)*, Journal of Natural Gas Science and Engineering vol. 23 pp. 517-523, Elsevier 2015
- [7] Janicka A., Rodak M., Skrętowicz M., Trzmiel K., Włostowski R., Zawiślak M. *Evaluation of the efficiency of the internal combustion engine powered by syngas*, International Conference EcoVarna 2015, Varna 2015
- [8] Wajand J. A., *Tłokowe silniki średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa 2005