

Zbigniew ROBAK
Tomasz ILUK
Aleksander SOBOLEWSKI
Marek RUDKOWSKI
Czesław SMOLKA

PTNSS–2013–SC–151

Results of studies on John Deere 4045 engine fueled with coke oven gas

Abstract: The subject of research was an engine John Deere 4045 with mechanical power of 50 kW customized for dual fuel operation on ON/coke oven gas, driving an electricity generator. Very promising effects as well as low emission of pollutants were obtained with 8-9% of nominal ON dosage. Series of test has been conducted to select proper amount of ignition injection which were done together with use of flue gas emission measurements. Research was done using real gas in Coke plant "Jadwiga" in Zabrze. Gas was subjected to additional scrubbing of naphthalene with use of original technology of coke oven gas purification. Acquired results and experience gained, opened the path for the use of, cheaper in exploitation, co generators of high power.

Keywords: piston engine, compression ignition, coke gas

Wyniki badań silnika John Deere 4045 zasilanego gazem koksowniczym

Streszczenie: Przedmiotem badań był silnik John Deere 4045 o mocy mechanicznej 50 kW przystosowany do zasilania dwupaliwowego ON/gaz koksowniczy, napędzający agregat prądotwórczy. Uzyskano bardzo obiecujące efekty przy 8-9% nominalnej dawki ON oraz niską emisję zanieczyszczeń. Przeprowadzono serie testów nad doborem optymalnej wielkości dawki zapłonowej połączone z pomiarami składu emitowanych spalin. Badania prowadzono z wykorzystaniem rzeczywistego gazu w Kombinacie Koksochemicznym S.A. w Koksowni „Jadwiga” w Zabrzu. Gaz poddano dodatkowej operacji usuwania naftalenu przy wykorzystaniu oryginalnej technologii oczyszczania gazu koksowniczego. Uzyskane wyniki i zebrane doświadczenia otwierają drogę do wykorzystania tańszych w eksploatacji agregatów kogeneracyjnych dużych mocy.

Słowa kluczowe: silnik tłokowy, zapłon samoczynny, gaz koksowniczy

1. Wprowadzenie

Gaz koksowniczy, jego skład oraz wartość opałowa predysponują go do wykorzystania jako wartościowe paliwo energetyczne [1, 2]. Jego zaletą jest niska emisja CO₂, ze względu na wysoką zawartość wodoru, oraz cena znacznie korzystniejsza niż gazu ziemnego natomiast wadą zawarte zanieczyszczenia, które mogą być przyczyną problemów eksploatacyjnych oraz zwiększonej emisji zanieczyszczeń.

W klasycznych stacjonarnych silnikach gazowych, ze względu na prostotę, najbardziej rozpowszechniły się układy zasilania jednopaliwowego z zapłonem iskrowym. Zastosowanie dwupaliwowego układu zasilania gazem (dual-fuel) wymaga dość istotnych modyfikacji silników z zapłonem samoczynnym. Poprawna praca silnika dwupaliwowego jest uwarunkowana właściwym sterowaniem czasem wtrysku i wielkością dawki zapłonowej oleju napędowego w całym zakresie obciążeń i prędkości obrotowych silnika. Przy obecnych szerokich możliwościach elektronicznego sterowania pracą silnika, zaprogramowanie optymalnej dawki paliwa zapłonowego ze względu na osiągi silnika i spełnienie norm środowiskowych jest możliwe, jednak przy pewnych ograniczeniach. Charakterystyki spalania oleju napędowego i spalania gazu różnią

się między sobą, wobec czego aby uzyskać wymagany poziom czystości spalin wybiera się kompromis pomiędzy możliwymi do uzyskania osiągnięciami silnika i emisją zanieczyszczeń [3]. Zależność ilości oleju napędowego i gazu ze względu na utrzymanie optymalnych parametrów pracy i minimalnej emisji zanieczyszczeń spalin jest ustalana podczas badań silnika dla całego zakresu obciążeń. Dla każdego typu silnika gazowego określa się osobny program dawkowania ilości gazu i oleju napędowego [4,5]. Właściwy dobór komponentów instalacji zasilania gazowego i sposobu ich zamontowania wymaga przeprowadzenia prób silnika na stanowisku badawczym.

2. Przeprowadzenie badań i otrzymane wyniki

Przygotowane zostało stanowisko badawcze do badań eksploatacyjnych silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym, który wyprodukowany został przez firmę JOHN DEERE. Silnik tłokowy charakteryzuje się mocą mechaniczną 50 kW i zasilany jest gazem koksowniczym. Stanowisko badawcze zlokalizowane zostało na Koksowni Jadwiga należącej do Kombinatu Koksochemicznego „Zabrze” S.A., co zapewniało dostęp do realnego gazu koksowniczego. W skład stanowiska wchodzi:



a)



b)



c)



d)

Rys. 1 Stanowisko badawcze do badań pilotażowych silnika gazowego:

- a) widok ogólny stanowiska,
- b) silnik i generator w obudowie dźwiękoszczelnej,
- c) układ usuwania naftalenu z gazu koksowniczego,
- d) mieszalnik i zawór trójdrożny do dozowania gazu koksowniczego do systemu poboru powietrza.

- silnik sprzężony z generatorem prądu zmiennego firmy Marelli MJL200SA4 o mocy wyjściowej 32 kW,
- układ przygotowania gazu koksowniczego, usuwania naftalenu [2],
- system podawania gazu do silnika wraz z zaworem z płynną regulacją przyprływu gazu sterowanym silnikiem krokowym,
- panel operatorski sterownika RGK60 firmy LOVATO ELECTRIC,
- zestaw grzałek oporowych do odbioru wytworzonej energii elektrycznej,
- aparaturę kontrolno – pomiarową i osprzęt dodatkowy wraz z układem automatycznego odcinania dopływu gazu na wypadek sytuacji awaryjnych.

Widok stanowiska badawczego oraz jego wybranych elementów przedstawiono na rys. 1.

Po wstępnych próbach rozruchowych zespołu silnik-generator przeprowadzono kilkugodzinne badania pracy silnika mającego na celu składu dobór paliwa, w szczególności optymalizację udziału gazu koksowniczego w mieszance paliwowej

olej napędowy -gaz koksowniczy. Testowano pracę silnika przy różnych nastawach silnika krokowego, co pociągało za sobą zróżnicowany udział gazu koksowniczego w paliwie silnika. Regulacja stopnia otwarcia silnika krokowego (K) odbywała się w zakresie od 10 do 50%. Stopień otwarcia umożliwiał w sposób płynny regulację strumienia gazu kierowanego do silnika tłokowego. Wykonano pomiary zużycia oleju napędowego i gazu koksowniczego przy poszczególnych nastawach silnika krokowego oraz wyliczono podział strumienia energii chemicznej dostarczanej do silnika na pochodzący z oleju i z gazu. Pomiary i obliczenia wykonano dla dwóch różnych średnic dyszy wlotowych powietrza, przez które dozowany jest gaz koksowniczy (oznaczony w tablicach jako COG) do silnika. Otrzymane wyniki pomiarów zestawiono w tablicach 1 i 2.

Przedstawiona w tablicach sprawność wytwarzania energii elektrycznej w badanej jednostce prądotwórczej wyznaczono z następującej

Tablica 1

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń udziału energetycznego oleju napędowego i gazu koksowniczego w mieszance paliwowej silnika dwupaliwowego o zapłonie samoczynnym, średnica dyszy wlotowej powietrza 27,1 mm

Paliwo	ON [l/h]	Strumień E ON [MJ/h]	COG [m ³ /h]	Strumień E COG [MJ/h]	Suma E [MJ/h]	ON [%]	COG [%]	Sprawność wytwarzania en. elektrycznej [%]
Olej napędowy	10,08	355,42	0,00		358,44	100,0		32,1
ON + COG 10K	9,12	321,57	2,26	40,61	362,18	88,8	11,2	31,8
ON + COG 20K	7,44	262,33	6,14	110,59	372,93	70,3	29,7	30,9
ON + COG 30K	5,16	181,94	9,72	174,96	356,90	51,0	49,0	32,3
ON + COG 40K	4,32	152,32	11,52	207,36	359,68	42,3	57,7	32,0
ON + COG 50K	4,08	143,86	12,00	216,00	359,86	40,0	60,0	32,0
ON + COG 50K 24 kW	2,04	71,93	11,99	215,78	287,71	25,0	75,0	30,0
ON + COG 50K 16 kW	0,48	16,92	12,30	221,40	238,32	7,1	92,9	24,2

Tablica 2

Zestawienie wyników pomiarów i obliczeń udziału energetycznego oleju napędowego i gazu koksowniczego w mieszance paliwowej silnika dwupaliwowego o zapłonie samoczynnym, średnica dyszy wlotowej powietrza 22,3 mm

Paliwo	ON [l/h]	Strumień E ON [MJ/h]	COG [m ³ /h]	Strumień E COG [MJ/h]	SUMA E [MJ/h]	ON [%]	COG [%]	Sprawność wytwarzania en. elektrycznej [%]
Olej napędowy	10,32	366,98	0,00	0,0	367,0	100,0	0,0	31,4%
ON + COG 10K	9,12	324,31	2,50	44,9	369,2	87,8	12,2	31,2%
ON + COG 20K	5,76	204,83	6,96	125,3	330,1	62,0	38,0	34,9%
ON + COG 30K	5,04	179,22	10,60	190,7	370,0	48,4	51,6	31,1%
ON + COG 40K	3,84	136,55	12,66	227,9	364,4	37,5	62,5	31,6%
ON + COG 50K	3,36	119,48	14,16	254,9	374,4	31,9	68,1	30,8%
ON + COG 50K 26 kW	1,68	59,74	14,40	259,2	318,9	18,7	81,3	29,4%
ON + COG 50K 21 kW	0,36	12,80	14,64	263,5	276,3	4,6	95,4	27,4%
ON 32 kW	9,84	349,91	0	0	349,91	100,0	0	32,9%

zależności:

$$\eta_{el} = \frac{N_{el}}{E_{ch}}$$

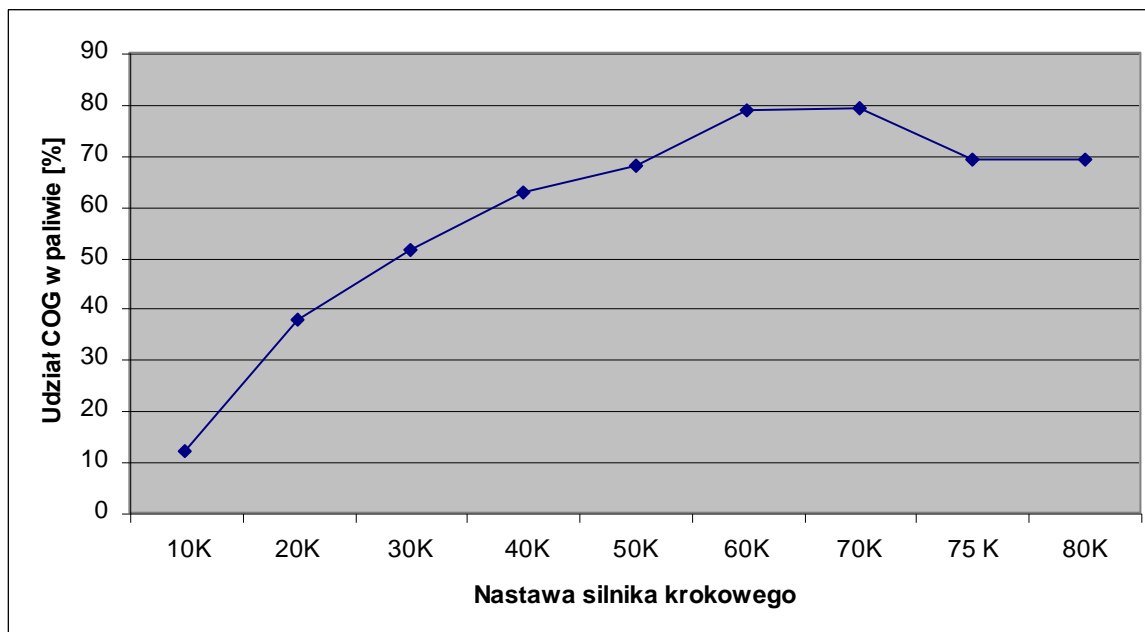
Gdzie, N_{el} to wytwarzana moc elektryczna,

a E_{ch} to strumień energii chemicznej paliwa. W przypadku zasilania układu skojarzonego gazem koksowniczym oraz olejem napędowym wzór powyższy przyjmuje następującą postać:

$$\eta_{el} = \frac{N_{el}}{m_{gaz} \cdot W_{d.gaz} + m_{ol.nap.} \cdot W_{d.ol.nap.}}$$

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów zestawionych w tablicach 1 i 2 w dalszych badaniach silnika postanowiono wykorzystać dyszę wlotu powietrza o średnicy 22,3 mm. Dla tej dyszy przeprowadzono precyzyjne określenie optymalnej dawki zapłonowej oleju napędowego dla różnych nastaw silnika krokowego przy pełnym obciążeniu silnika 32 kW. Zmiany udziału gazu koksowniczego w mieszance paliwowej dla różnych nastaw silnika krokowego w zakresie do 80 kroków przedstawiono na rysunku 2.

Przeprowadzono także dwie serie pomiarów składu spalin z silnika podczas jego pracy przy różnym udziale gazu koksowniczego w paliwie, w zakresie od 10 do 50 kroków silnika krokowego,



Rys. 2 Określenie optymalnej dawki zapłonowej oleju napędowego. Wzrost udziału gazu koksowniczego w mieszaninie paliwa przy różnych nastawach silnika krokowego. Średnica dyszy gardzielowej 22,3 mm, pełne obciążenie silnika 32 kW

oraz przy różnym obciążeniu elektrycznym. Mierzono zawartość w spalinach tlenu, ditlenku węgla, tlenku węgla, metanu, ditlenku siarki, tlenków azotu oraz wodoru. Do pomiarów składu spalin wykorzystano system analizatorów firmy SIEMENS ULTRAMAT 23 i OXYMAT 61, dodatkowo do pomiarów stężenia wodoru wykorzystano analizator firmy SICK. Układy pomiarowe analizatorów podłączone były do komputera co pozwoliło w sposób ciągły rejestrować wyniki pomiarów co 30s. Uśrednione wyniki analiz spalin dla różnych wariantów pracy układu silnik – generator przedstawiono w tablicach 3 i 4.

Otrzymywane w trakcie badań wartość NO_x przekraczał wartość 1000 ppm. Z uwagi na fakt, że przy mniejszych obciążeniach (np. 16 kW) wartości NO_x były poniżej 1000 ppm należy domniemywać, że przekroczone wartości były nieznacznie większe od 1000 ppm.

Obserwacje poczynione podczas przeprowadzonych badań wstępnych silnika oraz otrzymane wyniki przeprowadzonych pomiarów zostały wykorzystane dla przygotowania prób pracy silnika non – stop. Poniżej podano przyjęte założenia, do przeprowadzenia tych testów:

- próba non – stop powinna trwać minimum 36 godzin,
- przyjęto optymalną nastawę silnika krokowego 60 kroków jako optymalną dla pracy silnika gazowego i wynikający stąd skład paliwa i stosunek olej napędowy / gaz koksowniczy,
- w testach wykorzystano dyszę dolotową powietrza o średnicy 22,3 mm,
- testy non – stop prowadzone będą zarówno pod pełnym obciążeniem silnika jak i przy obniżonym obciążeniu,

- przyjęto, że stosunek oleju napędowego, do zraszania skrubera w układzie wymywania naftalenu z gazu koksowniczego, do gazu koksowniczego będzie zawierał się w granicach 1 – 4 (dm^3/m^3),
- zużyty olej napędowy wycofywany z układu wymywania naftalenu z gazu koksowniczego dodawano do oleju spalanego w silniku jako dawkę zapłonową.

Podczas testów nadzorowane były następujące dane eksploatacyjne: nastawa silnika krokowego regulującego nastawę zaworu gazu, stan licznika gazu, stan licznika oleju napędowego pompowanego na skruber, częstotliwość produkowanego prądu, odbierana moc energii elektrycznej, prawidłowość działania odbiorników mocy oraz wszystkich innych elementów stanowiska badawczego. Z dostępnych danych obliczano średnie zużycie gazu koksowniczego oraz ilość oleju napędowego podawanego na skruber w jednostce czasu. Przeprowadzone zostały 3 testy pracy silnika non – stop, dwa przy pełnym obciążeniu agregatu prądotwórczego 32 kW oraz jeden przy obciążeniu 22 kW (ok. 70%). Po zakończeniu każdego z testów non – stop, bezpośrednio po zatrzymaniu silnika, wykonywano pomiar zużycia oleju napędowego przy tych samych parametrach pracy jak podczas testu. W tym celu odłączano przelewowy przewód paliwowy podający olej z baku do układu wtryskowego i przekładano go do laboratoryjnego szklanego cylindra miarowego wypełnionego olejem napędowym. Na czas pomiaru silnik pobierał dawkę zapłonową oleju z cylindra miarowego, co w prosty sposób przy pomocy stopera umożliwiała precyzyjne określenie ilości pobieranego do zapłonu oleju napędowego. Dane tych testów oraz wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 5.

Tablica 3
Wyniki pomiarów składu spalin silnika dwupaliwowego przy różnym udziale gazu koksowniczego w paliwie, średnica dyszy wlotowej powietrza 27,1 mm

	O ₂ [%]	CO[%]	CO ₂ [%]	H ₂ [%]	CH ₄ [%]	SO ₂ ppm]	NO _x ppm]
ON	9,07	0,02	8,40	0,27	0,19	0	> 1000
ON+COG 10K	9,03	0,04	8,20	0,22	0,12	16	> 1000
ON+COG 20K	8,76	0,08	7,80	0,26	0,29	63	> 1000
ON+COG 30K	8,77	0,08	7,25	0,24	0,41	81	> 1000
ON+COG 40K	8,86	0,08	7,05	0,51	0,23	122	> 1000
ON+COG 50K	8,79	0,08	7,13	0,31	0,37	136	> 1000
ON+COG 50K, 24 kW	9,75	0,07	7,23	0,33	0,45	136	> 842
ON+COG 50K, 16 kW	11,79	0,05	6,48	0,25	0,27	88	> 780

Tablica 4
Wyniki pomiarów składu spalin silnika dwupaliwowego przy różnym udziale gazu koksowniczego w paliwie, średnica dyszy wlotowej powietrza 22,3 mm

	O ₂ [%]	CO [%]	CO ₂ [%]	H ₂ [%]	CH ₄ [%]	SO ₂ [ppm]	NO _x [ppm]
ON	7,9	0,02	9,3	0,3	0,9	0	> 1000
ON+COG 10K	7,7	0,04	9,2	0,1	1,0	23	> 1000
ON+COG 20K	10,5	0,07	8,7	0,1	1,0	76	950
ON+COG 30K	7,6	0,06	8,1	0,5	0,9	103	> 1000
ON+COG 40K	7,4	0,06	7,9	0,2	0,8	136	> 1000
ON+COG 50K	7,0	0,06	8,0	0,2	0,9	167	> 1000
ON+COG 50K, 26 kW	9,7	0,06	6,0	0,3	0,7	167	860
ON+COG 50K, 21 kW	12,1	0,06	4,6	0,4	1,0	165	740

Podstawowe dane ruchowe pracy silnika dwupaliwowego oraz wyniki otrzymane podczas testów non – stop.

	Test 1	Test 2	Test 3
Obciążenie [kW]	32	32	23
Czas trwania testu [h]	48	72	48
Średnia ilość oleju w cyrkulacji na skrubler [dm ³ /h]	39,5	20,2	20,5
Stosunek O/G w skruberze [dm ³ /m ³]	2,7	1,4	1,5
Odświeżanie oleju do skrubera [dm ³ /h] (do baku)	1	0,5	0,5
Zużywana ilość gazu [m ³ /h]	14,9	14,3	13,9
Dawka energii z gazu [MJ/h]	268,2	257,4	250,2
Oszacowane zużycie oleju napędowego [dm ³ /h]	2,9	2,7	0,7
Dawka energii z oleju napędowego [MJ/h]	102,3	95,9	25,2
Suma energii chemicznej w paliwie [MJ/h]	370,5	353,3	275,4
Udział procentowy energii w mieszance paliwa ON/COG	28 / 72	27 / 73	9 / 91
Sprawność elektryczna układu silnik generator [%]	31,1	32,6	29,8
Dawka zapłonowa oleju/gaz [dm³/m³]	0,19	0,19	0,05
Dawka zapłonowa oleju [dm ³ /100m ³ gazu]	19,3	18,8	5,1
Dawka zapłonowa oleju/gaz [kg/kg]	0,353	0,345	0,093

3. Omówienie wyników badań

Przeprowadzone badania testowe dwupaliwowego silnika o zapłonie samoczynnym napędzanego gazem koksowniczym w warunkach rzeczywistych dostarczyły szeregu danych, które po szczegółowej analizie pozwalają na ocenę koncepcji wykorzystania silnika Diesla do utylizacji gazu koksowniczego. Kluczowym zagadnieniem zarówno z punktu widzenia równomiernej i bezawaryjnej pracy silnika jak i opłacalności produkcji energii jest optymalny dobór dawki zapłonowej oleju napędowego. Wysoki udział oleju w paliwie zapewnia stabilną pracę silnika jednak podnosi znacząco koszty, co czyni całe przedsięwzięcie nieopłacalnym. Mała dawka zapłonowa zapewnia korzystny, wysoki udział gazu koksowniczego w paliwie jednak powodować może przerywaną, niestabilną pracę silnika, co da w efekcie częstsze awarie oraz skróci żywotność elementów silnika. Na przewodzie doprowadzającym gaz koksowniczy do mieszalnika umieszczono zawór dławiący z regulacją położenia oraz zawór z płynną regulacją przepływu gazu sterowany silnikiem krokowym z zakresem regulacji 0 – 225 kroków. Z doświadczenia firmy przygotowującej silnik do badań wynika, że optymalne ustawienie silnika krokowego powinno mieścić się w zakresie 40 – 70 kroków. W układzie dozowania i mieszania gazu z powietrzem możliwa jest wymiana dysz gardzielowych i taki dobór ich średnicy, aby dopasować ilość pobieranego

gazu z powietrzem niezbędnym do spalania paliwa.

Analiza otrzymanych wyników testów pracy silnika dla dwóch średnic dysz wykazały, że korzystniejsza jest mniejsza średnica i taka została wykorzystana do przeprowadzenia testów pracy non – stop. Korzystny wpływ zmniejszenia średnicy dyszy widać zwłaszcza dla pracy silnika pod zmniejszonym obciążeniem, kiedy dawka zapłonowa oleju napędowego spada przy obciążeniu 21 kW (66% obciążenia maksymalnego) nawet do poziomu 5%, przy spadku sprawności elektrycznej tylko o 5% (do wartości 27% przy 32% sprawności przy maksymalnym obciążeniu).

Przeprowadzone testy przy różnych nastawach silnika krokowego pozwoliły zaobserwować, że przyrost ilości pobieranego gazu ze wzrostem ilości „kroków” silnika nie jest zależnością liniową.

W znacznym stopniu układ ten zachowuje się „inteligentnie” dobierając odpowiedni stosunek powietrza i gazu. Zmiany udziału gazu koksowniczego w paliwie dla różnych nastaw silnika krokowego i dla różnych średnic dysz gardzielowych przedstawiono na rysunku 2 (patrz tablice 1 i 2). Wykonane pomiary składu paliwa: oleju napędowego / gazu koksowniczego przy różnych nastawach silnika krokowego pozwalają stwierdzić, że zwiększanie stopnia otwarcia zaworu do 60 kroków daje wzrost udziału gazu koksowniczego w paliwie (obniżenie dawki zapłonowej). Dalsze zwiększanie ilości kro-

ków nie obniża dawki zapłonowej oleju napędowego a wręcz obserwujemy efekt odwrotny polegający na obniżeniu udziału gazu w paliwie i tym samym wzroście dawki zapłonowej oleju. Także, co bardzo istotne dla eksploatacji silnika, jego praca w zakresie wyższych nastaw silnika krokowego staje się nierównomierna, co grozi wystąpieniem różnych sytuacji awaryjnych.

Za bezpieczną dla silnika i dającą optymalne zużycie gazu oraz oleju napędowego nastawę silnika krokowego przyjęto 60 kroków. W przeprowadzonych testach non – stop potwierdzone zostały wyniki uzyskane we wcześniejszych badaniach silnika mających na celu określenie podstawowych warunków jego pracy z wykorzystaniem gazu koksowniczego jako paliwa. Testy prowadzone pod pełnym obciążeniem wykazały, że silnik, aby pracował stabilnie przy pełnym obciążeniu musi mieć dawkę zapłonowa olej napędowego na poziomie $19 \text{ dm}^3/100 \text{ m}^3$ gazu, przy sprawności 31 – 32 %. Dla badanego silnika o mocy mechanicznej 50 kW, stanowi to 27 – 28 % wkładu energetycznego dla napędu tego silnika i zużycie oleju $2,7 - 2,8 \text{ dm}^3/\text{h}$. Zdecydowanie bardziej korzystna jest praca przy niepełnym obciążeniu. Podczas testu przy zmniejszonym obciążeniu do 23 kW (ok. 72 % maksymalnego obciążenia) dawka zapłonowa wynosiła ok. $5 \text{ dm}^3/100 \text{ m}^3$ gazu przy sprawności elektrycznej obniżonej tylko do 29,8%. W przeliczeniu na udział energetyczny dawka zapłonowa paliwa wynosiła wtedy 9% przy stabilnej pracy silnika.

Przeprowadzone pomiary składu spalin pozwoliły określić zawartość: O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , H_2 oraz CH_4 w spalinach. Stężenie w tych związków zależy od warunków spalania, które w głównej mierze stanowią funkcję ilości podawanego tlenu do spalania. W przeprowadzonych badaniach silnik nie miał możliwości regulacji ilości powietrza, dlatego te pomiary potraktowane zostały tylko informacyjne jako poziom odniesienia do ewentualnych dalszych badań, które będą miały na celu minimalizację współczynników emisji. Na tym etapie badań najważniejsze było określenia warunków optymalnej pracy silnika, w tym stosunku ON/COG w podawanym paliwie. Na pewno istnieją możliwości obniżenia do niższych zawartości CO , NO_x , wodoru oraz metanu. Rozpatrywane są potencjalnie takie rozwiązania jak: zaopatrzenie silnika w przepustnicę na wlocie powietrza i recyrkulację spalin. Nie ma możliwości obniżenia zawartości SO_2 ze względu na wysoką zawartość związków siarki (głównie H_2S), które muszą być spalane do ditlenku siarki bez względu na inne uwarunkowania. Ten fakt ogranicza także zastosowanie katalizatora spalania.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych pomiarów składu spalin pozwalają także stwierdzić, że praca na niepełnym obciążeniu jest korzystna

także dla obniżenia współczynników emisji substancji szkodliwych.

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły potwierdzić przydatność silnika tłokowego o zapłonie samoczynnym do produkcji energii elektrycznej i ciepła w jednostce kogeneracyjnej z wykorzystaniem gazu koksowniczego jako paliwa. Problemem jest wzrost kosztów eksploatacji silnika spowodowany koniecznością stosowania dawki zapłonowej oleju napędowego nawet w ilości poniżej 10 % dostarczanej energii. Wyniki oszacowań ekonomicznych przedsięwzięcia zależą w znacznej mierze od przyjętych założeń, które są zmienne i mocno uzależnione od aktualnych uwarunkowań rynkowych, najważniejsze z nich to:

- przyjęta cena gazu koksowniczego, możliwy zakres od 100 do 300 zł/1000 m^3 ,
- przyjęta cena energii elektrycznej i ciepła (na pokrycie potrzeb własnych lub na sprzedaż),
- koszt oleju stosowanego jako dawka zapłonowa, wysokość akcyzy (olej napędowy lub bioester),
- wysokość niezbędnych nakładów inwestycyjnych,
- wysokość dodatkowych kosztów eksploatacyjnych,
- dodatkowy dochód z uzyskania żółtych świadectw pochodzenia energii.

Wstępne wyliczenia, nawet przy przyjęciu najbardziej niekorzystnych założeń pozwalają przewidywać uzyskanie dodatniego efektu ekonomicznego. Najbardziej korzystny wariant to wyzyskanie własnego gazu koksowniczego oraz produkcja energii elektrycznej i ciepła na własne potrzeby. Jest to jednoznaczne, że najkorzystniejsza jest lokalizacja silników gazowych sprzężonych z jednostkami kogeneracyjnymi na zakładach koksowniczych dysponujących własnym gazem oraz zużywających znaczne ilości energii elektrycznej i ciepła.

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Potwierdzono przydatność koncepcji wykorzystania dwupaliwowego silnika Diesla do utylizacji gazu koksowniczego w kierunku produkcji energii elektrycznej i ciepła
2. Kluczowym zagadnieniem zarówno z punktu widzenia równomiernej i bezawaryjnej pracy silnika jak i opłacalności produkcji energii w silniku dwupaliwowym jest optymalny dobór dawki zapłonowej oleju napędowego
3. Badania wykazały, że bardzo korzystne obniżenie dawki zapłonowej oleju osiąga się przy obniżonym obciążeniu silnika, obserwowano spadek nawet do poziomu poniżej 5% udziału energetycznego w suma-

- rycznym paliwie, przy niewielkim spadku wydajności elektrycznej układu
4. Eksploatacja silnika przy niepełnym obciążeniu korzystnie wpływa także na obniżenie zawartości tlenków azotu w spalinach
 5. Konieczne jest podjęcie działań mających na celu obniżenie zawartości szkodliwych związków w spalinach np. poprzez zmianę

- współczynnika nadmiaru powietrza lub zastosowanie recyrkulacji spalin
6. Ze względu na wysoką zawartość siarki w gazie koksowniczym nie przewiduje się zastosowania katalizatora w układzie wydechowym silnika

Skróty i oznaczenia

ON Olej napędowy
 COG Gaz koksowniczy
 K Silnik krokowy
 E Strumień energii

N_{el} Moc elektryczna
 W_d Wartość opałowa paliwa
 m Strumień

Bibliografia

- [1] A. Karcz, "Gaz koksowniczy jako surowiec do produkcji wodoru", *Polityka Energetyczna*, 2009, 12, 111 – 117
- [2] A. Sobolewski, M. Ściążko, Z. Robak, M. Rudkowski, Z. Borowiec, Gaz koksowniczy paliwem do silnika gazowego, V Międzynarodowy Kongres Silników Spalinowych, VI 2013, Bielsko Biała.
- [3] H.S.Tira i in. The study of simulated biogas on combustion and emission characteristics in compression ignition engines, *Combustion Engines*, 2010, 2(141), 27 – 32
- [4] K.Cupiał, S.Szwaja, "Producer gas combustion in the internal combustion engine", *Combustion Engines*, 2010, 2(141), 27 – 32
- [5] Z. Stelmasiak, Aplikacja dwupaliwowego systemu zasilania w silnikach ZS średniej mocy", VII Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Silniki Gazowe 2010, Hucisko, czerwiec 2010

Dr inż. Robak Zbigniew, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu.



Dr inż. Iluk Tomasz, Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu.



Dr inż. Sobolewski Aleksander - Zastępca Dyrektora ds. Badań i Rozwoju w Instytucie Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrzu.



Dr inż. Rudkowski Marek, NGV Autogas Sp. z o.o., Kraków



Smolka Czesław
 Technolog KK Zabrze

