

Wear tests of an IC engine fueled aggressive landfill gas in long-term operation

Abstract: The paper presents results of wear tests of an internal combustion engine working on raw landfill gas. Particularly, lubricating oil degradation rate and metallic contamination in oil resulted from friction were of the interest. Furthermore, several other engine oil parameters were discussed. Investigation was conducted using two various lubricating oils. Time of engine continuous work under research was 1000 h. On the basis of results from the research works conclusion on fast degradation of the oil in the engine fed raw landfill gas was confirmed. These both oils applied to the tests were characterized with similar rate of their degradation and similar content of metallic contamination, that led to conclusion on similar wear processes of engine parts in these both tests. It was evaluated, that lubricating oil exchange period for the engine working under specified circumstances should not exceed 1000 h.

Keywords: engine, wear, lubricating oil, long-term engine operation, landfill gas

Badania zużyciowe silnika zasilanego agresywnym gazem wysypiskowym pracującego w cyklu długoterminowym

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań zużyciowych silnika pracującego na surowym gazie wysypiskowym. Szczególnie zwrócono uwagę na szybkość degradacji oleju silnikowego oraz poziom zanieczyszczeń metalicznych w oleju będących wynikiem działania procesów ściernych w silniku. Ponadto omówiono inne parametry oleju silnikowego, podlegające pogorszeniu. Badania przeprowadzono na dwóch różnych olejach silnikowych. Okres eksploatacji silnika podlegający badaniom wynosił 1000 godzin jego ciągłej pracy. Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano wyniki potwierdzające postępującą degradację oleju smarującego w silniku zasilanym biogazem wysypiskowym. Obydwa oleje silnikowe użyte do badań wykazywały porównywalny stopień degradacji oraz porównywalną zawartość substancji metalicznych, co świadczyło o podobnym przebiegu zużycia elementów silnikowych. Oceniono, że okres cyklicznej wymiany oleju dla silnika pracującego w takich warunkach nie powinien przekraczać 1000 godzin pracy.

Słowa kluczowe: silnik, zużycie, olej smarujący, długotrwała eksploatacja silnika, gaz wysypiskowy

1. Wstęp

Metan jest nie tylko głównym składnikiem gazu ziemnego, ale także gazów powstających w wyniku procesów gnilnych zachodzących w substancji organicznej. Zatem wydzielanie metanu towarzyszy procesowi naturalnej biodegradacji odpadów mającym miejsce na składowiskach odpadów komunalnych, popularnie zwanych wysypiskami śmieci, na których częstokroć można poczuć obecność odorów czyli substancji zapachowych wprowadzających dyskomfort życia dla okolicznych mieszkańców. Udział metanu w produktach procesu fermentacji beztlenowej może dochodzić nawet do 60% [1,2]. Taki gaz ze względu na swoją relatywnie wysoką kaloryczność jest gazem atrakcyjnym pod względem wykorzystania go jako paliwa dla silnika spalinowego. Stąd odgazowywanie wysypisk śmieci, szczególnie tych zawierających duże ilości biomasy odpadowej, jest działaniem pożądanym pod względem pozyskiwania korzyści energetycznych jak również redukcji w wydzielaniu substancji odorowych.

Dotychczas przeprowadzone badania [1–4] potwierdzają celowość stosowania biogazu jako paliwa dla tłokowego silnika spalinowego. Ze względu na stosowanie silnika częstokroć w układzie skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła [5] wymaga się od niego dobrej stabilności pracy, co wymaga dostarczania paliwa o względnie stabilnym składzie chemicznym i wartości opałowej. W przypadku gazu wysypiskowego zawartość substancji palnej w tym głównie metanu może się wahać w relatywnie dużych granicach, co pociąga za sobą konieczność stosowania przeróżnych zabiegów inżynierskich w celu zapewnienia prawidłowego przebiegu spalania bez objawów spalania stukowego lub tzw. „wypadania zapłonów” [6–8]. Ponadto, w przypadku gazu pozyskiwanego ze składowiska odpadów można spodziewać się również dużego rozrzutu w zakresie takich gazów jak siarkowodór i chlor – aczkolwiek występujących w śladowych ilościach, jednakże posiadających własności korozyjne i mających istotny wpływ na degradację oleju smarującego. Dodatkowo, na szybsze zużycie oleju wpływa także podwyższona temperatura spalania biogazu w silniku [9].

W artykule zamieszczono wyniki badań silnika ZI zasilanego gazem wysypiskowym i eksploatawanego przez okres 1000 godzin jego ciągłej pracy na dwóch różnych olejach. Jednym z olejów był olej Delgas M40 produkowany przez Orlen Oil sp. z o.o. Drugim olejem był renomowany olej uznanego światowego producenta, rekomendowany przez wytwórców stacjonarnych silników gazowych.

2. Opis stanowiska badawczego

Badaniom poddano silnik SW 680, który został odprężony i wyposażony w układ zapłonowy, tak aby mógł być przystosowany do pracy na biogazie bez objawów spalania stukowego [7,8]. W tabelicy 1 przedstawiono dane techniczne zmodyfikowanego silnika SW 680 oraz pozostałe, wybrane dane agregatu prądotwórczego.

Tabela 1. Dane silnika i agregatu prądotwórczego
Table 1. Generating set and engine specifications

Typ silnika	Wolnossący SW 680
Układ i liczba cylindrów	rzędowy, 6-cylindrowy
Pojemność skokowa	11,1 dm ³
Stopień sprężania	Zmniejszony do około 11
Prędkość obrotowa	1503-1506 obr/min
Moc znamionowa na biogazie (45% CH ₄)	55-65 kW
Kąt wyprzedzenia zapłonu	10° przed ZZP
Typ prądnicy elektrycznej	SG280, asynchroniczna, klatkowa
Moc prądnicy	90 kVA
Napięcie zasilania	3 x 400 V
Układ połączeń uzwojeń	„trójkąt”
Prędkość synchroniczna	1500 obr/min

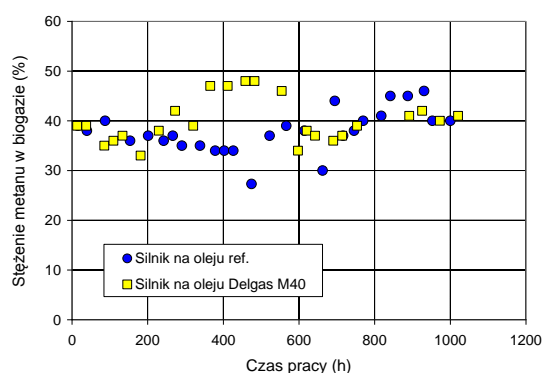
3. Wyniki badań i ich analiza

W trakcie badań mierzono następujące wielkości:

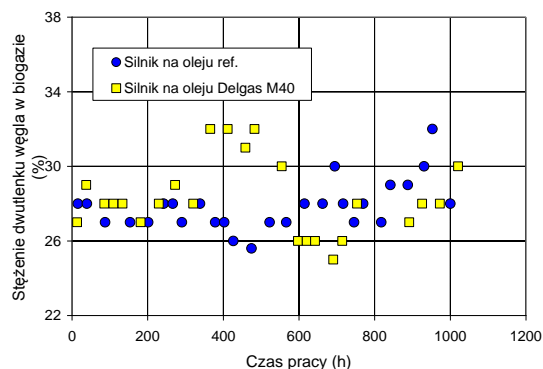
- ◆ skład gazu wysypiskowego:
 - zawartość metanu [CH₄],
 - dwutlenku węgla [CO₂],
 - siarkowodor,
 - ◆ skład spalin:
 - tlenek węgla – CO [ppm],
 - tlenki azotu NO_x [ppm],
 - niespalone węglowodory UHC [%],
 - ◆ ilość gazu pobieranego przez silnik,
 - ◆ współczynnik nadmiaru powietrza,
 - ◆ moc czynną oddawaną do sieci przez prądnicę,
 - ◆ temperaturę oleju,
 - ◆ ciśnienie oleju,
 - ◆ temperaturę płynu chłodzącego,
 - ◆ temperaturę spalin.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono procentową zawartość metanu i dwutlenku węgla w biogazie w sumarycznym okresie 2000 h nadzorowanej eksploatacji dla silnika pracującego na dwóch olejach smarujących (po 1000 h na każdym z olejów). Stężenie metanu zawierało się w przedziale pomiędzy 27 a 48%. Jednakże uśredniona zawartość metanu dla obydwu okresów badań była na podobnym poziomie i wynosiła 39,8% dla okresu eksploatacji oleju Delgas M40 i odpowiednio 38,7% dla oleju referencyjnego.

Stężenie siarkowodoru w biogazie nie było wysokie i zawierało się w przedziale od 50 do 800 ppm. Tak duże zróżnicowanie w zawartości siarkowodoru oraz metanu wynikało głównie ze zróżnicowania miejsc poboru gazu ze składowiska.

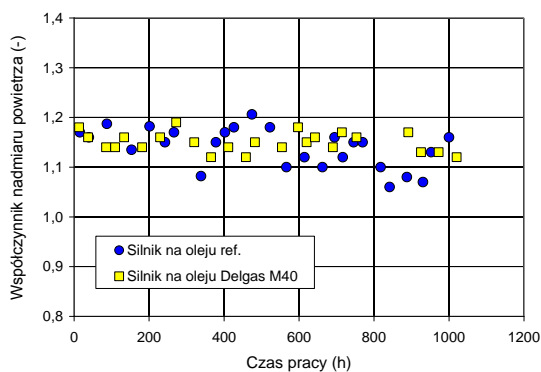


Rys. 1. Stężenie metanu w biogazie w funkcji czasu pracy silnika
Fig. 1. Methane content in landfill gas vs. engine work time

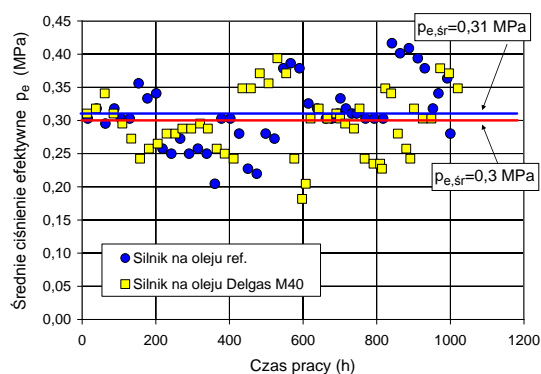


Rys. 2. Stężenie dwutlenku węgla w biogazie w funkcji czasu pracy silnika
Fig. 2. Carbon dioxide content in landfill gas vs. engine work time

Zużycie gazu przez silnik zależnie od składu tego gazu i jego wartości opałowej było na poziomie pomiędzy 9 a 13 dm³/s. Na rysunku 3 przedstawiono współczynnik nadmiaru powietrza dla mieszanki gazowo-powietrznej. Współczynnik nadmiaru powietrza utrzymywano na średnim poziomie około 1,15 co zapewniało stabilną pracę silnika przy jednocześnie względnie niskiej temperaturze spalin na średnim poziomie około 540°C i stężeniu NO_x nie przekraczającym 300 ppm. Średnie stężenie CO było na poziomie około 1500 ppm, a UHC odpowiednio 0,25 %. Duży wpływ na stężenie UHC miał używany przez silnik olej smarujący.



Rys. 3. Współczynnik nadmiaru powietrza (lambda) dla mieszanki gazowo-powietrznej w funkcji czasu pracy silnika
 Fig. 3. Relative equivalence ratio - lambda of the biogas-air mixture vs. engine work time



Rys. 4. Średnie ciśnienie efektywne w funkcji czasu pracy silnika
 Fig. 4. IMEP vs. engine work time

Na rysunku 4 przedstawiono średnie ciśnienie efektywne p_e silnika pracującego na biogazie wysypiskowym. Ciśnienie p_e obliczono na podstawie pomiaru mocy czynnej, elektrycznej oddawanej do sieci przez prądnicę przy uwzględnieniu sprawności mechanicznej prądnicy na poziomie 0,95. Średnie ciśnienie efektywne jest podstawowym i najważniejszym parametrem informującym o rzeczywistym obciążeniu silnika. Średnie ciśnienie efektywne p_e zawierało się pomiędzy 0,2 i 0,4 MPa podczas pracy silnika na obydwu olejach. Wartość p_e uśredniona na cały 1000 h okres pracy silnika była na poziomie odpowiednio: dla oleju Delgas M40 – 0,3 MPa, dla oleju referencyjnego – 0,31 MPa. Uśredniona wartość p_e jaką silnik osiągał na biogazie to wartość relatywnie nieduża w porównaniu do p_e dla tego samego silnika zasilanego paliwem ciekłym o wysokiej wartości opałowej jakim jest przykładowo olej napędowy. W przypadku zasilania silnika SW 680 olejem napędowym mógł on osiągnąć p_e na

poziomie około 1 MPa. Jednakże w przypadku pracy silnika na biogazie należy uwzględnić 3 czynniki wpływające na obniżenie p_e :

- silnik pracował z obniżonym stopniem sprężania, co wpłynęło na obniżenie jego sprawności i tym samym obniżenie mocy maksymalnej i średniego ciśnienia efektywnego;
- silnik pracował na biogazie wysypiskowym o średniej zawartości metanu na poziomie około 39%. Mieszanka palna powietrza z biogazem ze współczynnikiem nadmiaru powietrza na poziomie 1,12 posiada wartość opałową na poziomie około 2,6 MJ/Nm³. Dla silnika zasilanego olejem napędowym wartość ta wynosić może 3,5 MJ/Nm³. Stąd, w wyniku zamiany paliwa następuje spadek mocy silnika o około ¼ mocy nominalnej;
- silnik pracował jako wolnossący, wysysając biogaz ze złoża. Podciśnienie w rurociągu gazowym było na poziomie około 10-15 mbar, co powodowało znaczny spadek współczynnika napełnienia silnika w porównaniu do pracy na oleju napędowym.

W ramach badań analizie fizykochemicznej poddano następujące własności olejów:

- ♦ zawartość substancji zużyciowych silnika,
- ♦ zawartość mineralnych substancji zanieczyszczających olej,
- ♦ lepkość kinematyczną w temperaturze 40°C,
- ♦ lepkość kinematyczną w temperaturze 100°C,
- ♦ stopień utleniania,
- ♦ stopień nitratacji,
- ♦ stopień sulfonowania,
- ♦ liczba kwasowa AN,
- ♦ liczba zasadowa BN,
- ♦ wskaźnik i-pH,
- ♦ zawartość dodatków uszlachetniających.

W tabelicy 2 podano parametry fizykochemiczne świeżego oleju Delgas M40 i oleju referencyjnego. Natomiast w tabelicy 3 przedstawiono dopuszczalne parametry fizykochemiczne określone i zalecane przez firmę MWM dla olejów smarujących w stosowanych w silnikach ich produkcji.

Tablica 2. Parametry fizykochemiczne oleju Delgas M40 i oleju referencyjnego
 Table 2. Physical-chemical properties of both Delgas M40 and reference oil.

Parametr	Jednostka	Olej Delgas M40		Olej referencyjny	
		Wynik	Norma	Wynik	Norma
Lepkość kinematyczna w 40 °C	mm ² /s	117,2	ISO 3104	131	ASTM D 445
Lepkość kinematyczna w 100 °C	mm ² /s	13,2	ISO 3104	13,3	ASTM D 445
Wskaźnik lepkości	-	108	ISO 2909	98	ASTM D 2270
Temperatura płynięcia	°C	-36	ISO 3016	-18	ASTM D 97
Temperatura zapłonu w tyglu otwartym	°C	254	EN ISO 2592	257	ASTM D 92
Popiół siarczanowy	% m/m	0,89	ISO 3987	1,0	ASTM D 874
Całkowita liczba zasadowa TBN	mg KOH/g	10,4	PN-76/C-04163	10,8	ASTM D 2896
Odporność na pienienie					
Słonność do pienia / stabilność piany (I sekwencja)	cm ³ /cm ³	0/0		10/0	
Słonność do pienia / stabilność piany (II sekwencja)	cm ³ /cm ³	10/0		20/0	
Słonność do pienia / stabilność piany (III sekwencja)	cm ³ /cm ³	0/0		10/0	
Uwaga: Powyższe wartości parametrów fizykochemicznych są wartościami typowymi.					

Tablica 3. Dopuszczalne wartości niektórych substancji i wielkości dla olejów silnikowych
 Table 3. Limits for various substances in engine oil and its other properties

L.p.	Cecha	Dopuszczalne wartości	Metoda oznaczania
1.	Lepkość kinem. w 100°C	min. 12 mm ² /s max. 18 mm ² /s	DIN 51366, ASTM D 445, DIN EN ISO 3104
2.	Woda	max. 0,2 %	DIN 51777, ASTM D 1744, DIN ISO 12937
3.	Glikol	max. 500 ppm	DIN 51375, ASTM D 4291
4.	Liczba zasadowa BN	min. 2,0 mg KOH/g	ISO 3771, ASTM D 4739
5.	Liczba kwasowa AN	nie więcej niż BN	DIN EN 12634, ASTM 664
6.	SAN (strong acid number)	0 mg KOH/g	ASTM 664
7.	Wskaźnik i-pH	powyżej 4,5	
8.	Stopień utleniania	max. 20 A/cm	DIN 51453
9.	Stopień nitratacji	max. 20 A/cm	DIN 51453
10.	Krzem	max. 300 mg/kg	DIN 51396, ASTM D 5185
11.	Aluminium	max. 2 mg/kg na 100h	Zalecenia firmy MWM w zależności od typu silników przez nich produkowanych
12.	Chrom	max. 1 mg/kg na 100h	
13.	Miedź	max. 2 mg/kg na 100h	
14.	Żelazo	max. 3 mg/kg na 100h	
15.	Ołów	max. 2 mg/kg na 100h	
16.	Cyna	max. 1 mg/kg na 100h	

4. Wyniki badań eksploatacyjnych

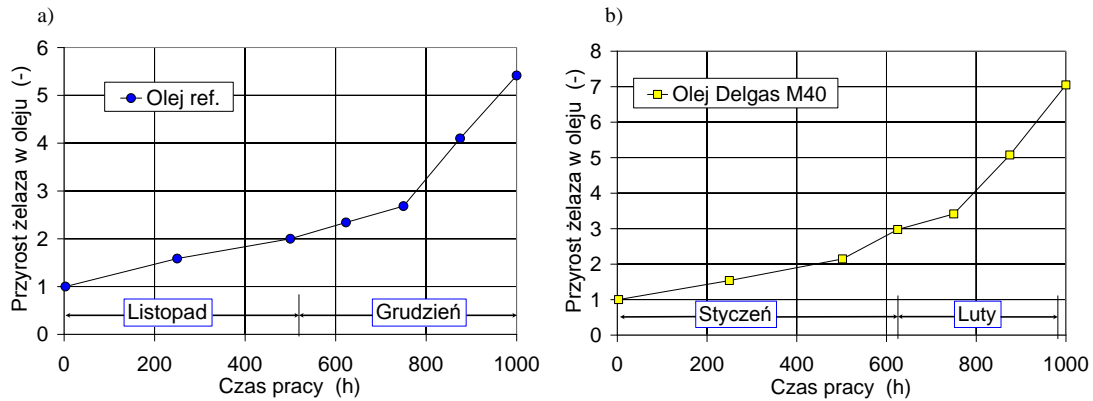
Na rysunku 5 przedstawiono przyrost zawartości masy żelaza występującego w oleju w zależności od czasu jego eksploatacji. Podano wartości względne w odniesieniu do takich samych wartości początkowych po przepłukaniu silnika nowym olejem i na-

stępnie jego ponownej wymianie. Takie przyjęcie wskaźnika wzrostu żelaza pokazuje rzeczywisty przyrost żelaza podczas okresu eksploatacji i eliminuje wpływ żelaza już nagromadzonego w silniku wskutek jego wcześniejszej eksploatacji i nieusuniętego z silnika w wyniku jego przepłukania. Żelazo występuje w oleju w wyniku ścierania się tulei cylin-

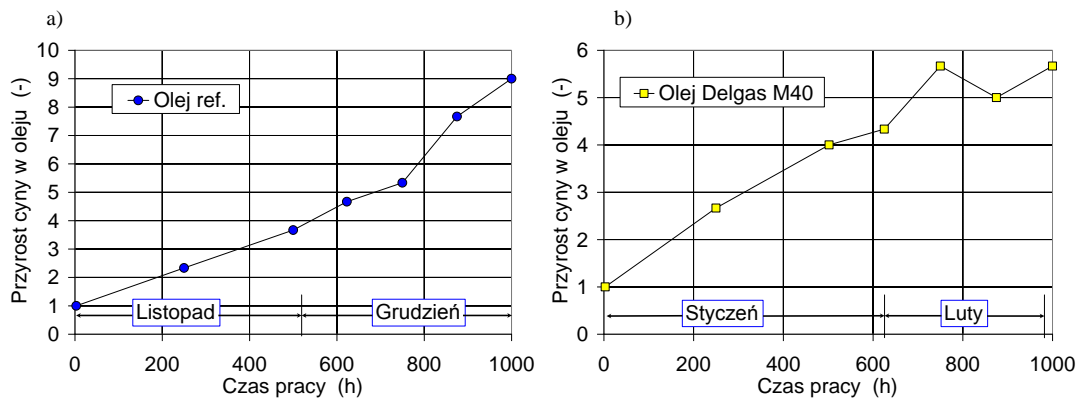
drowej oraz zaworów. Na rysunku 5 widoczny jest nieznacznie większy przyrost żelaza dla oleju Delgas M40 w porównaniu do oleju referencyjnego, co wynikało z częstszego uruchamiania zimnego silnika pracującego na oleju Delgas M40 w okresie zimowym. Na rysunku 6 przedstawiono przyrost zużycia cyny w silniku. Cyna jest składnikiem stopów używanych w panewkach łożysk ślizgowych. W obydwu

przypadkach można zauważyć podobnie przebiegający przyrost masy cyny zawartej w oleju smarującym.

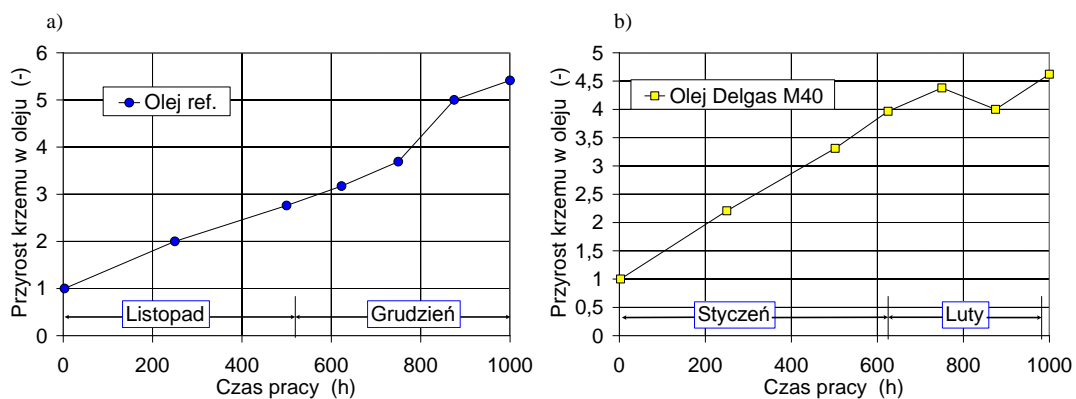
Na rysunku 7 pokazano przyrost zawartości masyowej krzemu w obydwu olejach. Krzem przedostaje się do oleju z otoczenia w postaci pyłu mineralnego zasysanego do silnika wraz z powietrzem i biogazem.



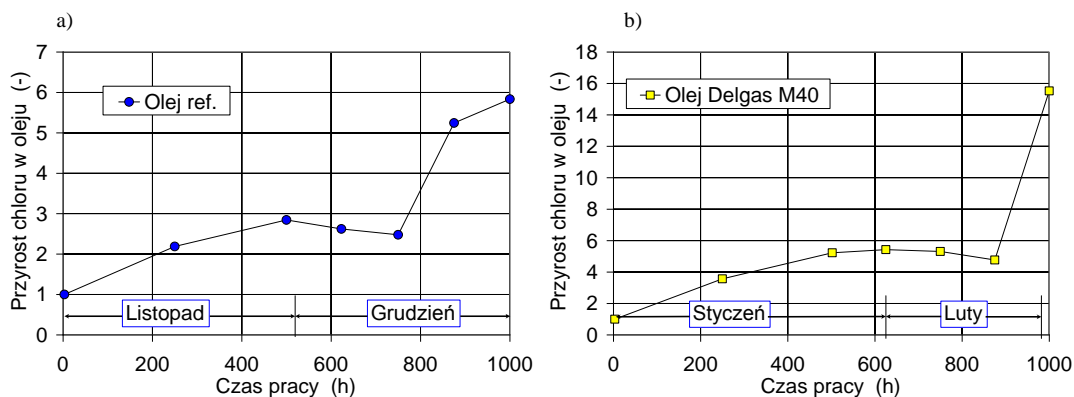
Rys. 5. Zawartość żelaza w olejach podczas testów: dla oleju referencyjnego (a), dla oleju Delgas M40 (b)
 Fig. 5. Iron content in the ref. oil (a) and in the oil Delgas M40 (b)



Rys. 6. Zawartość cyny w olejach podczas testów: dla oleju referencyjnego (a), dla oleju Delgas M40 (b)
 Fig. 6. Tin content in the ref. oil (a) and in the oil Delgas M40 (b)

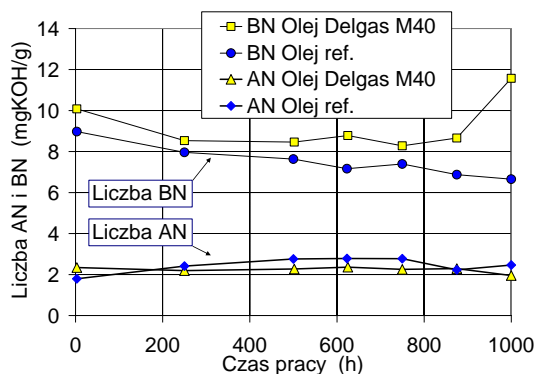


Rys. 7. Zawartość krzemu w olejach podczas testów: dla oleju referencyjnego (a), dla oleju Delgas M40 (b)
 Fig. 7. Silicon content in the ref. oil (a) and in the oil Delgas M40 (b)



Rys. 8. Zawartość chloru w olejach podczas testów: dla oleju referencyjnego (a), dla oleju Delgas M40 (b)
 Fig. 8. Chlorine content in the ref. oil (a) and in the oil Delgas M40 (b)

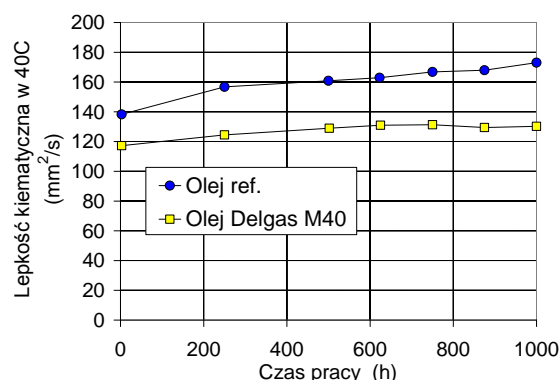
Na rysunku 8 przedstawiono względną zawartość chloru w obydwu olejach. Chlor do silnika dostawał się najprawdopodobniej w postaci chemicznie związanej tworząc sól NaCl rozpuszczoną w wilgoci zasysanej do silnika wraz z biogazem. Na składowisku odpadów jedna ze studzienek drenujących złoża była wykonana w miejscu, które charakteryzowało się dużym zasoleniem odpadów. Chlor jest składnikiem szczególnie niepożądanym w oleju, ponieważ podnosi jego liczbę kwasową AN powodując pogorszenie własności antykorozyjnych oleju. Z drugiej strony wzrost zawartości w oleju pierwiastka alkalicznego jakim jest sód wpływa na podwyższenie liczby zasadowej BN. Tym niemniej, obydwa pierwiastki traktowane jako substancje dodawane do oleju w sposób niekontrolowany poza procesem technologicznym jego produkcji należy uznać za niepożądane. Przebieg liczby zasadowej BN i liczby kwasowej AN pokazano na rysunku 9.



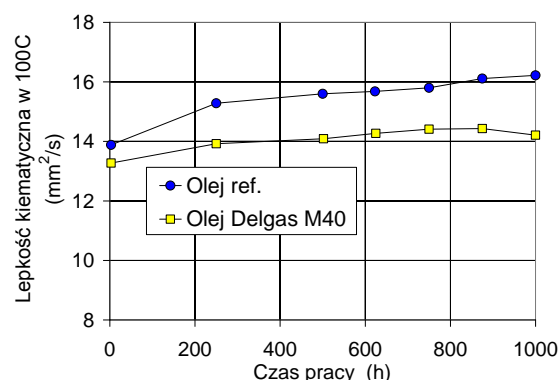
Rys. 9. Liczba zasadowa BN i liczba kwasowa AN w funkcji czasu pracy silnika
 Fig. 9. BN and AN Numbers vs. engine work time

Liczba zasadowa BN ma bardziej korzystny przebieg dla oleju Delgas M40 w porównaniu do oleju referencyjnego. Zmniejszanie się liczby BN w przypadku oleju Delgas M40 jest nieznaczne po przepracowaniu przez olej 1000h. Liczba BN dla oleju referencyjnego w tym okresie eksploatacji zmalała z 8,97 do 6,65. Liczba kwasowa AN dla

obydwu olejów jest na podobnym poziomie w przedziale pomiędzy 1,8 a 2,5. Stąd, korzystniejszy przebieg liczby BN dla oleju Delgas M40 pozwala ocenić go wyżej niż olej referencyjny. Zauważalny wzrost liczby BN dla oleju Delgas M40 w końcowej fazie eksploatacji silnika wynikał najprawdopodobniej, jak to nadmieniono wcześniej, z obecności dużej ilości rozpuszczonej soli w wilgoci zawartej w gazie wysypiskowym.



Rys. 10. Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C w zależności od czasu pracy silnika
 Fig. 10. Kinematic viscosity at 40°C vs. engine work time



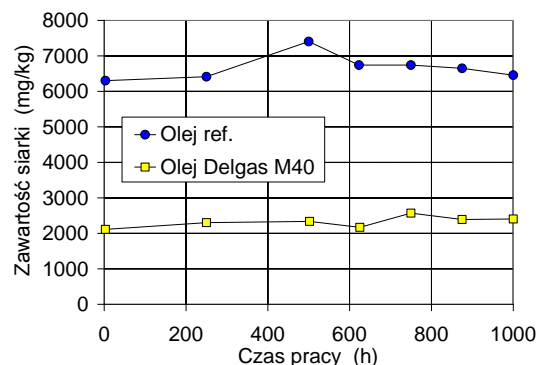
Rys. 11. Lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C w zależności od czasu pracy silnika
 Fig. 11. Kinematic viscosity at 100°C vs. engine work time

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono przebieg lepkości kinematycznej w temperaturze 40 i 100°C dla obydwu olejów.

Przebiegi zmian lepkości kinematycznej w funkcji czasu eksploatacji oleju wskazują na lepsze pod tym względem własności oleju Delgas M40, którego lepkość po 1000h pracy jest niższa od lepkości oleju referencyjnego. Niższa lepkość kinematyczna oleju przedkłada się na niższe straty tarcia, a tym samym na poprawę sprawności ogólnej silnika. Jest oczywistym, że ta lepkość nie może być zbyt niska, żeby nie doprowadzić do przzerwiania „filmu olejowego” i gwałtownego wzrostu współczynnika tarcia trących się powierzchni. Jak zaleca producent MWM lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C powinna zawierać się w przedziale pomiędzy 12 a 18 mm²/s.

W trakcie badań analizy chemicznej olejów zaobserwowano znacznie obniżoną zawartość siarki w oleju Delgas M40 w porównaniu do oleju referencyjnego (rys.12). Niska zawartość siarki w świeżym

oleju Delgas M40 prowadzi do wniosku, że jest on wyprodukowany w oparciu o lepszej jakości olej bazowy.



Rys. 12. Zawartość siarki w obydwu olejach podczas testów
Fig.12. Sulphur content in both oils vs. engine work time

Tablica 4. Zużycie oleju przez silnik (uzupełnianie stanu oleju)

Table 4. Oil consumption by the engine

Olej	L.p.	Ilość dolanego oleju (dm ³)	Data	Liczba pracowanych godzin	Szacunkowa ilość wyprod. energii (kWh)	Jednostkowe szacunkowe zużycie oleju (g/kWh)
Olej referencyjny	1.	0,7	19-11-2012	250h	10216	0,055
	2.	2	28-11-2012	500h	18671	0,117
	3.	1	03-12-2012	623h	24297	0,123
	4.	1,2	16-12-2012	750h	29515	0,134
	5.	0,7	21-12-2012	875h	35306	0,128
	6.	1,2	27-12-2012	1000h	41256	0,133
	Suma	6,8				
Olej Orlen Delgas M40	1.	1,8	22-01-2013	502h	19426	0,075
	2.	1,2	3-02-2013	625h	24030	0,101
	3.	1,8	09-02-2013	750h	29058	0,133
	4.	1,2	20-02-2013	875h	33500	0,145
	5.	2,5	3-03-2013	1000h	38887	0,177
	Suma	8,5				

Silniki gazowe z reguły pobierają więcej oleju w porównaniu do silników zasilanych klasycznymi paliwami ciekłymi. Ilość pobieranego oleju Q_{olej} w przeliczeniu na 1 kWh wykonanej przez silnik pracy jest na poziomie około 0,16 ml/kWh (olej referencyjny) i 0,2 ml/kWh (olej Delgas M40). W przeliczeniu na jednostkowe, objętościowe zużycie oleju przy założeniu sprawności prądnicy na poziomie 0,95 uzyska się wynik:

$$Q_{olej} = \frac{8,5dm^3}{40000kWh / 0,95} = 0,2cm^3 / kWh$$

Przyjmując gęstość oleju na poziomie 0,89 g/cm³ masa oleju o objętości 0,2 cm³ wynosi około 0,18 g.

Zatem, jednostkowe zużycie oleju jest na poziomie 0,2cm³/kWh (około 0,18g/kWh). Takie zużycie jest w normie i nie wskazuje na nadmierne zużycie silnika [10]. Podobne proporcje można zaobserwować w przypadku silników pojazdów eksploatowanych przy mocy częściowej charakterystycznej dla jazdy mieszanej miejskiej i pozamiejskiej przy założeniu, że są to silniki niewyeksplloatowane.

5. Wnioski

1. Na podstawie analizy fizykochemicznej próbek obydwóch olejów pobranych z przedziału czasowego od 0 do 1000h pracy można stwierdzić, że oleje te ulegały degradacji w takim samym stopniu. Zawartość metali zużyciowych (żelazo, cyna) w obydwóch olejach wzrastała podobnie, co świadczy o podob-

nym zużyciu ciernym panewek w czopach głównych, korbowych i w główkach korbowodów, zaworów w prowadnicach i w gniazdach, pierścieni tłokowych i tulei cylindrowych.

2. W zakresie zmian liczby zasadowej BN świadczącej o odporności oleju na korozyjne oddziaływanie na silnik można stwierdzić, że olej Delgas M40 podczas badań wykazał lepsze wartości tej liczby. Podobny wniosek można wyciągnąć odnośnie liczby kwasowej AN. Dla oleju Delgas M40 liczba kwasowa AN pozostawała praktycznie na tym samym poziomie tj. 2,34 i 2,25, co wynika również z mniejszej początkowej zawartości siarki w oleju Delgas M40.

3. W zakresie zawartości zewnętrznych substancji zanieczyszczających olej nie zaobserwowano znaczącej różnicy pomiędzy obydwoma olejami z wyjątkiem zawartości sodu i chloru. Szczególnie było to zauważalne w końcowej fazie testu oleju Delgas M40. Znacznie podwyższona zawartość tych pierwiastków świadczyła o poborze biogazu ze złoża wysypiskowego, w którym znajdowały się duże ilości soli. Należy podkreślić, że zawartość ww. substancji w dużej mierze zależy od metod usuwania wilgoci z surowego gazu wysypiskowego jak również zależy od pory roku i intensywności opadów

atmosferycznych na wysypisku podlegającym odgazywaniu.

4. W zakresie lepkości kinematycznej olej Delgas M40 charakteryzuje się lepszymi wartościami aniżeli olej referencyjny. Lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C wzrastała dla obydwu olejów, przy czym dla oleju Delgas M40 wzrastała z 13,27 do 14,21 mm²/s, a dla oleju referencyjnego od wartości początkowej 13,88 do 16,22 mm²/s. Wartości graniczne lepkości, pomiędzy którymi powinien znajdować się olej to 12 i 18 mm²/s. Podobny trend wystąpił dla lepkości kinematycznej w 40°C. Niższa lepkość kinematyczna prowadzi do niższych strat tarcia w silniku, a tym samym do wyższej sprawności i niższego zużycia paliwa. Dodatkowo na korzyść oleju Delgas M40 świadczy niższa temperatura płynięcia (tablica 2). Jest to istotne podczas rozruchu silnika w okresie zimowym, szczególnie gdy silnik pracuje w pomieszczeniu nieogrzewanym.

5. Zużycie oleju przez silnik było prawidłowe dla obydwu olejów.

6. Na podstawie przeprowadzonym badań można stwierdzić, że obydwa oleje mogą być stosowane w tłokowych silnikach spalinowych zasilanych gazami bogatymi w metan, do których należą: gaz wysypiskowy, gaz fermentacyjny, gaz kopalniany, gaz ziemny itp.

Skróty i oznaczenia/*Nomenclature*

AN – Liczba kwasowa /*Acid Number*
BN – Liczba zasadowa /*Basic Number*
IC – Internal Combustion

IMEP – Indicated Mean Effective Pressure
 p_e – średnie ciśnienie indykowane /*IMEP*

Wykaz literatury/*Bibliography*

- [1] Karapidakis E.S., Tsave A.A., Soupios P.M., Katsigiannis Y.A.: Energy efficiency and environmental impact of biogas utilization in landfills, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, 7(3), pp.599-608, 2010.
- [2] Szwaja S., Kovacs V., Bereczky A., Penninger A.: Sewage sludge producer gas enriched with methane as a fuel to a spark ignited engine, *Fuel Processing Technology*, 110, pp.160–166, 2013.
- [3] Cupiał K., Szwaja S.: Producer gas combustion in the internal combustion engine, *Combustion Engines*, No. 2/2010(141), pp.27-32, 2010.
- [4] Kovacs V.B., Torok A., Bereczky A., Szwaja S.: Biogas utilization in an internal combustion engine working in a serial hybrid propulsion system, *Combustion Engines*, No 1/2012, pp.17-24, 2012.
- [5] Cupiał K., Szwaja S.: The IC engine energetically combined with the steam turbine, *Combustion Engines*, PTNSS-2011-SC-118, No. 3/2011(146), 2011.
- [6] Szwaja S., Jamrozik A., Tutak W.: A two-stage combustion system for burning lean gasoline mixtures in a stationary spark ignited engine, *Applied Energy*, 105, pp.271-281, 2013.
- [7] Szwaja S., Jamrozik A.: Analysis of combustion knock in the SI engine, *Combustion Engines*, PTNSS-2009-SC-046, pp.128-135, 2009.
- [8] Szwaja S.: Hydrogen rich gases combustion in the IC engine, *Journal of Kones – Power-*

train and Transport, vol.16, No.4, pp.447-455, 2009.

- [9] Szwaja S., Tutak W., Grab-Rogaliński K., Jamrozik A., Kociszewski A.: Selected combustion parameters of biogas at elevated pressure-temperature conditions, Combustion Engines, No. 1/2012, pp.40-47, 2012.

Mr Michał Skrobecki, MSc. Eng. – Specialist in the Research and Development Department of Orlen Oil.

Mgr inż. Michał Skrobecki – specjalista w Biurze Badań i Rozwoju Orlen Oil.



- [10] Dużyński A.: Commercial operation of the biogas cogeneration set with the JMS 316 GS-B.LC GE JENBACHER type engine, Combustion Engines, No. 1/2013, (152), pp.56-70, 2013.

Mr Stanisław Szwaja, DSc., DEng. – Professor in the Mechanical Engineering and Computer Science Faculty at Częstochowa University of Technology.

Dr hab. inż. Stanisław Szwaja – profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

