

## Application of glycerine for powering piston diesel engines of large power

All over the world glycerine production is growing due to continuously increasing demand for biodiesel. For every ton of produced bio-diesel 100-110 kg of glycerine is obtained as a by-product. There is many methods and ways of use of the obtained glycerine, beginning with processing it into other products in pharmaceutical industry, chemical industry and others, through adding it to fuels or direct combustion in engines. In case of direct combustion of glycerine in piston diesel engines there exists a problem of the low cetane number of glycerine fuel which makes difficult burning it in combustion engines. The paper will present the method of glycerine combustion in a diesel engine without necessity of using pilot fuel or additives improving the cetane number of a fuel in the form of glycerine. Additionally, there will be presented the results of the operational research of gaseous pollution emission and fuel consumption by the electric power generator consisting of: MTU V652 engine and AvK DIDB140 generator powered by diesel oil and 98.5 % technical glycerine. The unit was loaded up to 12000 kW power.

Key words: glycerine, glycerine combustion in piston combustion engines, gaseous pollution emission

### Zastosowanie gliceryny do zasilania tłokowych silników wysokoprężnych dużej mocy

Na całym świecie produkcja gliceryny jest coraz większa ze względu na stale rosnące zapotrzebowanie na biodiesla. Na każdą tonę wyprodukowanego biodiesla uzyskuje się 100-110 kg gliceryny, jako produktu ubocznego. Istnieje wiele metod i sposobów wykorzystania powstałej gliceryny, począwszy od przetwarzania jej na inne produkty w przemyśle farmaceutycznym, chemicznym itp., poprzez dodawania jej do paliw czy bezpośredniego spalania w silnikach spalinowych. W przypadku bezpośredniego spalania gliceryny w tłokowych silnikach wysokoprężnych występuje problem niskiej liczby cetanowej paliwa glicerynowego, która utrudnia proces spalania w silnikach spalinowych. W artykule przedstawiona została metoda spalania gliceryny w silniku wysokoprężnym, bez potrzeby stosowania paliwa pilotażowego lub dodatków poprawiających wartość cetanową gliceryny jako paliwa. Przedstawione zostaną ponadto, wyniki badań eksploatacyjnych emisji zanieczyszczeń gazowych i wielkości zużycia paliwa agregatu prądotwórczego składającego się z silnika MTU V652 i prądnicy AvK typ DIDB140, zasilanego paliwem w postaci oleju napędowego oraz gliceryną techniczną 98,5% obciążonego mocą do 1200 kW.

Słowa kluczowe: gliceryna, spalanie gliceryny w tłokowych silnikach spalinowych, emisja zanieczyszczeń gazowych

### 1. Wprowadzenie

Produkcja biodiesla z surowica roślinnego i zwierzęcego skutkuje powstaniem gliceryny jako produktu ubocznego. Ponad 100 kg gliceryny jest produkowane z każdej tony przetworzonego biodiesla. Zdolność przemysłu farmaceutycznego, chemicznego, rolnego oraz pokrewnych do konsumpcji gliceryny jest ograniczona, zatem należy szukać metod i środków umożliwiających utylizację gliceryny z jednoczesnym pozyskiwaniem energii z tego procesu.

W pracy [6] przedstawiono obecnie dostępne metody utylizacji gliceryny z jednoczesnym odyskiwaniem energii z tego procesu. Jednakże nie wskazano metody spalania gliceryny w tłokowych silnikach spalinowych jako możliwej i ekonomicznie uzasadnionej. Stwierdzono, że tego typu proces jest fizycznie niemożliwy (bez dawki inicjującej zapłon),

a jednocześnie szkodliwy dla silnika i jego układów w wyniku towarzyszącej procesowi spalania polimeryzacji i powstawaniu dużej ilości toksycznych związków chemicznych.

W innej pracy [7] stwierdzono, że „gliceryna jest słabym paliwem” którego nie da się spalić w silnikach nisko i wysokoprężnych bez dawki inicjującej zapłon lub energii dostarczonej za pomocą świecy zapłonowej. Wynika to z faktu, iż nie uda się uzyskać w suwie sprężenia odpowiednio wysokiej temperatury aby nastąpił samozapłon wtrysniętego do cylindra paliwa w postaci gliceryny.

Można odnaleźć metody utylizacji gliceryny za pomocą fermentacji, jednakże taki sposób odzysku energii w stosunku do procesu spalania gliceryny w silniku jest 2, 3 razy mniejszy niż spalanie go bezpośrednio w silnikach cieplnych [1].

Modelowanie zachowania się gliceryny, jako paliwa do zasilania tłokowych silników wysokoprężnych można odnaleźć w pracy [2]. Zgodnie z opracowanymi wynikami symulacji, spalanie gliceryny w silniku wysokoprężnym nie jest możliwe, ze względu na brak wystarczającej energii cieplnej do samozapłonu wtrysniętej dawki gliceryny do cylindra. Chociaż zdaniem autorów [4] powyższe opracowanie zostało opublikowane po udanych eksperymentach spalania gliceryny w silniku wysokoprężnym w roku 2008.

Konwencjonalny olej napędowy jest złożoną mieszaniną różnych nasyconych i nienasyconych węglowodorów wzbogaconych dodatkami polepszającymi jakość procesu spalania. Gliceryna z kolei jest zbudowana z pojedynczych związków i kinetyka jej spalania powinna być znacznie mniej skomplikowana, aczkolwiek obecnie nie można odnaleźć szczegółowych badań dotyczących tego procesu.

Analizując dostępną literaturę problemu można stwierdzić, że w celu uzyskania warunków spalania paliwa glicerynowego w silniku wysokoprężnym należy zaadoptować pojedynczo lub w kombinacji poniższe parametry silnika poprzez [4]:

- a) zwiększenie stopnia sprężania w cylindrze;
- b) podniesienie współczynnika napełniania cylindra powietrzem;
- c) podniesienie temperatury powietrza zasilającego cylinder.

Poprzez podniesienie stopnia sprężania w cylindrze uzyska się podniesienie temperatury i ciśnienia gazów w cylindrze, co przeloży się na umożliwienie stworzenia warunków samozapłonu paliwa glicerynowego. Jednakże ze względu na konstrukcję silnika jest to trudne do osiągnięcia bez dodatkowych nakładów.

Zwiększenie masowego natężenia przepływu przez silnik dla danego stopnia sprężenia poprzez podniesienie prędkości obrotowej wału korbowego silnika uzyska się wzrost temperatury w końcu procesu sprężania umożliwiający zapłon gliceryny w cylindrze jednakże, ogranicza to możliwości eksploatacji silnika w pełnym zakresie prędkości.

Podniesienie temperatury powietrza wlotowego podczas pracy silnika do wartości z zakresu  $60\pm 200^{\circ}\text{C}$  umożliwi zapłon cieczy lub gazu o dowolnej liczbie cetanowej [4].

W celu uzyskania wysokiej sprawności procesu spalania, czystości spalin i wydajności procesu spalania, a jednocześnie ograniczenia złożoności systemów sterowania, adaptacyjnych i katalitycznych układów zasilania i wydechowych tłokowych silników spalinowych należy poszukiwać nowych, czystych i odnawialnych paliw alternatywnych.

Przykładem takiego paliwa jest gliceryna [1], która charakteryzuje się wysoką masą w stosunku do wartości opałowej, wysoką zawartością tlenu (posiada także bardzo korzystne własności w odniesieniu do emisji cząstek stałych, ale niską liczbę cetanową), ma bardzo wysoką temperaturę zapłonu, jest

czysta, w pełni biodegradowalna, odnawialna, ma wysokie właściwości smarne i może być stosowana w dowolnym silniku wysokoprężnym. Ponadto jest szeroko dostępna w dużych ilościach, z potencjałem wzrostu, przy rozsądnych i przewidywanych kosztach zakupu.

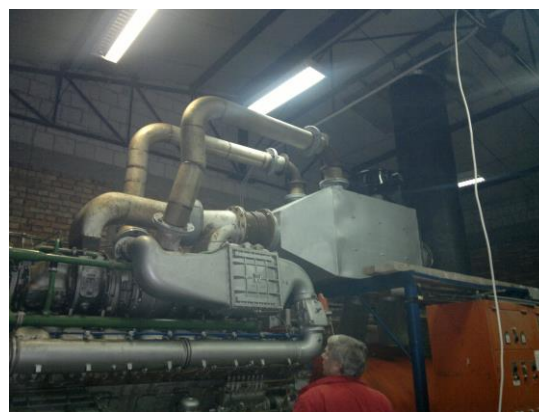
Gliceryna [4] jest również nietoksyczna, nie jest niebezpieczna i nie wymaga żadnych specjalnych zmian konstrukcyjnych układów zasilania by ją stosować. Zawartość tlenu w glicerynie wynosi 52%, a ponieważ jest napowietrzoną mieszaniną cząstek można oczekiwać, że ten tlen będzie wykorzystywany w procesie spalania. Ponadto, gliceryna ma prostą budowę strukturalną, zatem kinetyka spalania mieszanki powinna być prosta i czas trwania procesu powinien być krótszy, niż w konwencjonalnych olejach napędowych.

Celem prezentowanych badań było określenie możliwości zastosowania gliceryny technicznej 98,5%, jako paliwa do zasilania silnika MTU V652 i prądnicy AvK typ DIDB140 obciążonego mocą do 1200 kW.

## 2. Badania eksperymentalne

### 2.1. Obiekt badań

Obiektem badań eksperymentalnych był zespół prądotwórczy MTU V652 - AvK typ DIDB140, zasilany paliwem w postaci oleju napędowego lub gliceryny technicznej 98,5%. Widok przedmiotowego agregatu zamieszczono na rys. 1. Silnik funkcjonował w oparciu o cykl „McNeil’a” [3], który obejmuje korekcję temperatury powietrza dolotowego oraz przepływu masy. Nie wprowadzono żadnych modyfikacji w elementach silnika ani systemie wtrysku paliwa.



Rys. 1. Widok ogólny agregatu prądotwórczego MTU V652 - AvK typ DIDB140 z wyróżniającą się nagrzewnicą powietrza zasilającego (Smykówko, 06-03-2013)

Agregat prądotwórczy MTU V652 - AvK typ DIDB140, jest kompaktową wytwornicą prądu przemiennego, którego głównymi elementami są: źródło napędu w postaci silnika wysokoprężnego (MTU V652) oraz prądnicy prądu przemiennego (AvK typ DIDB140). Wybrane dane dotyczące przedmiotowego agregatu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne agregat prądowórczego MTU V652 - AvK typ DIDB140

Źródło napędu - MTU V652a	Prądnica - AvK typ DIDB140
<p>Typ silnika: MB16V652 Nr fabryczny: 21283, rok produkcji: 1975 r. Sposób posadowienia: rama własna - samonośna Moc maksymalna: 1560 kW (DIN6270), Obroty nominalne: n= 1500 obr/min Rodzaj pracy: czterosuwowy, wysokoprężny Pojemność skokowa: 104,3 dm<sup>3</sup> Stopień sprężania: <math>\epsilon=15,25</math> Dofadowanie: turbodoładowarka Ilość cylindrów: 16 (widlasty 45°) wtrysku komora spalania: zasobnikowa Jednostkowe zużycie paliwa: 217 g/kWh Regulator obrotów: mechaniczno-hydrauliczny Podgrzewacz powietrza zasilającego silnik - zasilany gazami spalinowymi Układ smarowania: sucha miska olejowa Czynnik chłodzący: ciecz</p>	<p>Typ prądnicy: A13b4-K00, Rodzaj: stacjonarny, Dane elektryczne: P = 1550 kVA, <math>\cos\phi = 0,8</math>, Rodzaj pracy: ciągły, Obroty znamionowe: 1500 obr/min</p>

Podczas badań agregat prądowórczy obciążany był za pomocą trzech obciążników rezystorowych o łącznej mocy 1500 kW. Z tych systemów obciążeń identyfikowane było obciążenie elektryczne układu generatorowego podczas badań.

Agregat prądowórczy zabudowany jest na ramie samonośnej, która ustawiona była za pośrednictwem poduszek gumowych bezpośrednio na podstawie pomieszczenia bez konstrukcji dylatacyjnej posiadzki.

## 2.2. Paliwo

Olejem rozruchowym i końcowym był olej napędowy o wartości opałowej 42.5 MJ/kg. Zastosowana gliceryna była technicznie czysta w 98.5%. Gliceryna była podawana do układu wtryskującego silnika ze zbiornika poprzez pompę zębatą, nagrzewnicę oraz szeregowy 5-mikronowy filtr paliwa. Ciśnienie w układzie zasilania pompy paliwa utrzymywano na poziomie ok 2 bar. Gliceryna dostarczana do silnika posiadała temperaturę z zakresu 98-105° w celu zapewnienia wewnętrznej lepkości we wtryskiwaczu na poziomie  $\approx 8$  cSt. Właściwości fizyczne gliceryny zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Właściwości fizyczne gliceryny 98.5%

Wyróżnik cechy	Wartość
Czystość gliceryny	>98,5%
Wartość opałowa	15.92 MJ/kg
NaCl	<15 ppm
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<100 ppm
Zawartość wody	<1,5%

MONG (Matter Organic Not Glycerine – Materia organiczna bez gliceryny)	Nie regulowane
pH	>6,5
Ash (popiół)	<0,01% (<100 ppm)
Silicone	<2 ppm

## 2.3. Aparatura badawcza

Badania wartości i składu chemicznego wybranych produktów spalania przeprowadzono z wykorzystaniem następujących urządzeń diagnostycznych:

- Wieloskładnikowego analizatora spalin MOTORSCAN, typ KOMPACT 8003, produkcji MASTER® ENGINEERING, rok produkcji 1996 nr fab. 8107 – do identyfikacji wartości i składu chemicznego produktów spalania (świadcstwo legalizacji nr 6W2/40.2/13 z dnia 21.01.2013);
- Mikroprocesorowego miernika temperatury HI93530 firmy HANNA Instrument z sondą pomiarową typu HI 766F (zakres pomiarowy max 1100°C), – do pomiaru temperatury czynników gazowych (4 sztuki);
- Przenośnego pirometru IRtec P500+ – do identyfikacji temperatury wybranych elementów silnika;

## 3. Metodyka i przebieg badań

W niniejszym opracowaniu przyjęto założenie, że silnik będzie badany zgodnie z procedurami stosowanymi do tłokowych silników spalinowych pojazdów i maszyn roboczych, określonych w Dz. U. Nr 227. Badania przeprowadzono dla obciążania silnika 470, 960 i 1200 kW.

Ze względu na fakt iż badany silnik jest silnikiem wysokoprężnym dla którego procedura badawcza (Dz. U. Nr 227, Załącznik nr 4, §9.1- §11 i §12.1) przewiduje pomiar zadymienia spalin przy swobodnym przyśpieszaniu wału korbowego silnika w zakresie od prędkości obrotowej biegu jałowego do maksymalnej prędkości obrotowej, wyrażonej w postaci współczynnika pochłaniania światła (absorpcji) i uwzględniającej specyfikę funkcjonowania agregatu (stała prędkość obrotowa wału korbowego silnika) – nie ma możliwości przeprowadzenia pomiaru współczynnika pochłaniania światła zgodnie z procedurą badawczą (Dz. U. Nr 227, Załącznik nr 4, §12.1) za pomocą dymomierza.

W celu określenia wartości i składu chemicznego zanieczyszczeń gazowych emitowanych przez silnik MTU V652, zasilanego olejem napędowym i gliceryną techniczną, wykorzystano procedurę badawczą stosowaną przy ocenie emisji zanieczyszczeń gazowych silników niskoprężnych opisaną w Dz. U. Nr 227, Załącznik nr 4, §5-§8.1). Jednakże z wyżej wspomnianych względów badania przeprowadzono jedynie przy nominalnej prędkości obrotowej wału korbowego silnika.

Wg tej procedury rejestruje się wartości koncentracji CO [%], CO<sub>2</sub> [%], HC [ppm], O<sub>2</sub> [%], NO<sub>x</sub> [ppm] przy stałej prędkości obrotowej wału korbo-

wego silnika. Dla silnika MTU V652 przyjęto prędkość obrotową wału korbowego na poziomie 1500 obr/min.

Podczas zasilania silnika gliceryną dokonano mechanicznego przekierowania (za pomocą kłapy kierunkowej) świeżego ładunku powietrza zasilającego silnik przez przeciwbieżny wymiennik ciepła w celu podniesienia temperatury powietrza zasilającego silnik.

#### 4. Analiza wyników badań

W trakcie badań emisji zanieczyszczeń gazowych, przeprowadzono trzy powtórzenia pomiarów w odstępach ok. 1 min, w celu wyeliminowania wartości przypadkowych. Wyniki uśrednione wprowadzono do tabeli pomiarowej. Wyniki pomiarów wybranych parametrów fizyczno-chemicznych podczas badań zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie wybranych parametrów fizycznych i spalin emitowanych przez silnik MTU V652

Lp.	Godzina	Rodzaj paliwa	Tem. paliwa [°C]	Czas pomiaru [min]	n [obr/min]	Moc [kW]	Tem. p. pba. [°C]	Emisja					Temp. spalin [°C]	Ciepłota [kWh]			
								CO [%]	CO2 [%]	HC [ppm]	O2 [%]	NOx [ppm]					
1	15.58	ON	70	2	1500	470	60	0,06	1,70	16,00	18,10	180,00	50	-	60	420	1,4
2	16.01	ON	70	3	1500	960	90	0,00	5,80	1,00	12,07	528,00	58	-	80	480	1,4
3	16.05	ON	70	3	1500	1200	95	0,00	4,40	5,00	14,20	528,00	60	-	140	525	1,5
4	17.45	ON	75	5	1500	490	95	0,05	2,40	4,00	16,96	360,00	43	70	140	460	1,5
5	17.51	ON	75	5	1500	960	95	0,02	7,50	4,00	9,93	567,00	48	73	140	525	1,5
6	17.56	GL	100	6	1500	870	95	-	-	-	-	-	-	-	-	490	1,25
7	18.05	GL	100	5	1500	1200	95	0,00	5,10	8,00	14,50	100,00	67	65	200	485	1,3
8	18.10	GL	100	5	1500	1200	95	0,01	5,20	10,00	15,00	120,00	68	68	190	480	1,3
9	18.15	GL	100	2	1500	1200	98	0,01	4,90	12,00	16,00	95,00	65	65	200	485	1,3

ON - Olej napędowy, GL - Gliceryna techniczna 98,5%, Poz. 13 - termopara zamontowana na ścianie przewodu paliwowego na poziomie wyjściowej (kanał zasilający), Poz. 14 - termopara umieszczona w kanale, Poz. 15 - termopara umieszczona w kanale, Poz. 16 - termopara umieszczona w kanale (strudze gazów)

#### 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Powyższe pomiary zanieczyszczeń gazowych emitowane przez silnik MTU V652, dokonano pod obciążeniem prądnic, tj. w warunkach naturalnego funkcjonowania silnika.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można stwierdzić, że:

- zastosowanie jako paliwa gliceryny technicznej umożliwia funkcjonowanie silnika jako napędu generatora o mocy 1200 kW, funkcjonowanie silnika było stabilne, bez zakłóceń mechanicznych przez cały okres testów;
- w wyniku spalania gliceryny technicznej w silniku wysokoprężnym obserwuje się znaczny spadek emisji przez silnik związków NO<sub>x</sub>. Badania wykazały zmniejszenie ponad 6-cio krotne średniej emisji NO<sub>x</sub> w stosunku do porównywanego paliwa (oleju napędowego)

- w wyniku przekierowania powietrza zasilającego silnik przez wymiennik (nagrzewnicę) uzyskano wzrost temperatury powietrza ze 140°C (dla silnika funkcjonującego bez wymiennika) do wartości 190-200°C, okupione to zostało spadkiem ciśnienia doładowania z 1,5 bara do poziomu 1,3 bara;
- analizując emisję CO silnika zasilanego gliceryną techniczną można stwierdzić, że jest ona ponad 2,6 krotnie niższa niż emisja przy zastosowaniu oleju napędowego;
- widoczny nieznaczny wzrost emisji cząstek HC podczas testów dla układu zasilanego gliceryną techniczną był spowodowany przekroczeniem dopuszczalnej temperatury silnika (błąd obsługi silnika), co skutkowało migracją oleju smarnego do komory spalania i kolektora wydechowego. Nie należy tego łączyć z rodzajem paliwa zasilającego silnik;
- w procesie modyfikacji konstrukcji i właściwości silnika do zasilania go paliwem glicerynowym należy zatem uwzględnić podniesienie pojemności cieplnej układu chłodzenia;
- nie zauważono istotnego wpływu mocy generowanej przez zespół prądowców na poziomy emisji identyfikowanych zanieczyszczeń gazowych;
- podczas testów zauważono organoleptycznie (wzrokowo) brak zadymienia spalin (sadzy lub innych cząstek lotnych w gazach wydechowych) emitowanych podczas zasilania silnika gliceryną techniczną oraz brak jej woni;
- podczas badań przeprowadzono eksperyment polegający na zatrzymaniu funkcjonowania silnika zasilanego gliceryną techniczną. Po krótkiej chwili dokonano pomyślnej próby uruchomienia silnika zasilanego gliceryną techniczną, bez obciążenia;
- zużycie paliwa w postaci gliceryny technicznej wynosiło ok. 14,25 dm<sup>3</sup>/min, przy obciążeniu wału korbowego silnika na poziomie 1200 kW;
- uwzględniając wartość zużycia oleju napędowego, określoną eksperymentalnie przez producenta dla przedmiotowego silnika (krzywe zużycia paliwa) oraz wartość zużycia gliceryny technicznej, uzyskanej podczas badań, stosunek zużycia gliceryny technicznej do oleju napędowego wynosi ok. 2,25.

#### Bibliography/Literatura

- [1] [Day P. McNeil J., Sirovski F. (E)mision impossible? *The chemical engineer*. Tom ISSUE 839, 2011, p. 33-35.
- [2] Lábaj J., Barta, D., Lenhard, R. *CFD simulation of glycerol combustion in diesel engine*. Prague : Institute of Thermomechanics

- 
- AS CR, ISBN 978-80-87012-14-7, 2008, pp. 35–50.
- [3] McNeil J. Combustion method. 2460996 UK Patent. 2010.
- [4] McNeil J. Day P., Sirovski F. Glycerine from biodiesel: The perfect diesel fuel. *Process Safety and Environmental Protection - ELSEVIER*. Vol 90, Tom Part B, No 3, 2012,.
- [5] McNeil J. Efficient Combustion of Glycerol and Other Low Cetane Fuels in the Diesel Engine. *The Institution of Diesel and Gas Turbine Engineers publication. Power Eng.* 2011.
- [6] Pagliaro M., Rossi, M., Clark, J., Kraus, G. *The Future of Glycerol*. London: Royal Society of Chemistry. 2010.
- [7] Scharmer K., Vermeersch, G., Andronico, G. *Engine fuel from rapeseed*. brak miejsca : The EEIG-Eurobiodiesel-project. 2006.

Arkadiusz Rychlik Ph.D. The University of Warmia And Mazury, The Faculty Of Technical Sciences, Chair of Vehicles and Machinery Exploitation

*dr inż. Arkadiusz Rychlik, Uniwersytet Warmińsko Mazurski w Olsztynie, Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Wydział Nauk Technicznych, e-mail: rychter@uwm.edu.pl.*

*mgr inż. Łukasz Kibalczyk, Vice Prezes Zarządu, KLM – Energia sp. o.o. Smukówko 28, 14-100 Ostróda, e-mail: lukasz@klm-e.pl*