



## PROBLEMATYKA WYZNACZANIA WARTOŚCI OPAŁOWEJ MODYFIKOWANYCH PALIW ŻEGLUGOWYCH

Zbigniew Korczewski

Politechnika Gdańska,  
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa,  
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych  
ul. G. Narutowicza 11/12, 80–233 Gdańsk, tel/fax: (58) 347 21 81,  
*e-mail:* [z.korczewski@gmail.com](mailto:z.korczewski@gmail.com)

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono krótką charakterystykę modyfikowanych paliw żeglugowych wprowadzanych na rynek przez koncerny paliwowe PKN ORLEN S.A., LOTOS Asphalt Sp. z o.o. oraz STENA OIL (Szwecja) oraz ich podstawowe własności fizykochemiczne. Zwrócono szczególną uwagę na odpowiedni dobór lepkości paliwa zasilającego silnik okrętowy, który determinuje właściwy przebieg procesu spalania oraz odpowiednie warunki smarowania par precyzyjnych aparatury wtryskowej. Przybliżono technologię pomiaru ciepła spalania paliw ciekłych w kalorymetrze, wykorzystywaną dodatkowo do wstępnego, jakościowego i ilościowego oszacowania produktów pozostałościowych po spaleniu próbki paliwowej w tyglu bomby kalorymetrycznej, a także problemy badawcze związane z wyznaczeniem wartości opałowej pozostałościowych paliw żeglugowych.

Słowa kluczowe: modyfikowane paliwa żeglugowe, wartość opałowa, pomiary laboratoryjne.

### 1. Wprowadzenie

Od 2015 roku w Katedrze Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej realizowane są badania naukowe mające na celu zbudowanie specjalistycznego stanowiska laboratoryjnego, które umożliwi kompleksowe badanie silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego różnymi rodzajami pozostałościowych paliw żeglugowych, w tym zasilanych i modyfikowanych. Przewiduje się, że w ramach szerokiego programu badań, dofinansowanych przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku, opracowana zostanie metodyka oceny energetycznej nowo produkowanych paliw żeglugowych oraz oceny ich oddziaływania na emisyjność spalin silnikowych i zanieczyszczenie atmosfery toksycznymi i szkodliwymi związkami chemicznymi, jak również oceny skutków zastosowania tych paliw na intensywność degradacji elementów konstrukcyjnych silnika okrętowego. W wyniku realizacji pierwszego etapu badań zaprojektowano i skonstruowano reaktor procesowy, w którym odsiarczane są spaliny silnika laboratoryjnego metodą suchą, z zastosowaniem adsorbentów sodowych (wodorowęglan sodu) i ich modyfikacji [5,8].

W kolejnym etapie badań wykonano projekt oraz prototyp instalacji paliwowej silnika laboratoryjnego, która umożliwi etapowe, w pełni zautomatyzowane podgrzewanie i oczyszczanie (statyczne i dynamiczne) ciężkiego paliwa pozostałościowego przed podaniem do silnika, a także przełączanie zasilania silnika z paliwa destylacyjnego na pozostałościowe i odwrotnie. Została ona wyposażona w odpowiednią aparaturę pomiarową dla obserwacji parametrów fizykochemicznych obrabianego paliwa (lepkość dynamiczna, temperatura, ciśnienie) na drodze od zbiornika zapasowego do zbiornika zasilającego silnik [6,7]. Aby zrealizować zakładane cele badawcze,

konieczne było odwzorowanie, w odpowiedniej skali, cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych rzeczywistej instalacji zasilania paliwem pozostałościowym silnika okrętowego.

Badania prowadzone obecnie, tzw. pilotażowe mają na celu wstępną ocenę funkcjonalności dobranych podzespołów konstrukcyjnych zbudowanej instalacji paliwowej, jak również przydatności stacjonarnej i przenośnej aparatury pomiarowej. Przed rozpoczęciem realizacji zasadniczego programu badań eksperymentalnych konieczne również było wyznaczenie wartości opałowej dostarczonych próbek paliw żeglugowych, które dokonano w laboratoriach Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej oraz koncernu naftowego Grupa LOTOS S.A. - LOTOS Asphalt Sp. z o.o.

## 2. Charakterystyka modyfikowanych paliw żeglugowych

Do badań pilotażowych zbudowanego stanowiska laboratoryjnego wytypowano trzy różne paliwa żeglugowe: jedno destylacyjne – olej napędowy Ekodiesel ULTRA (PKN ORLEN S.A.) oraz dwa pozostałościowe, modyfikowane – tzw. hybrydowe RMD 80 - „ECA Fuel” (STENA OIL Szwecja) i RMG 380 (LOTOS Asphalt Sp. z o.o.) – tabela 1. Porównując zestawione w tabeli dane liczbowe z odpowiednimi wartościami parametrów fizykochemicznych przedmiotowych paliw widniejącymi w ofercie handlowej ich producentów można zauważyć, że występować mogą dość znaczne różnice, w zależności od dostarczonej partii paliwa. Producenci podają zazwyczaj wartości graniczne parametrów fizykochemicznych. Przykładowo, dla paliwa RMD 80, maksymalna wartość lepkości kinematycznej przy 50°C może wynosić nawet 80 mm<sup>2</sup>/s, a gęstości w 15°C – 975,0 kg/m<sup>3</sup> [6,11].

Tabela 1. Podstawowe własności fizykochemiczne paliw żeglugowych wytypowanych do badań (podane wartości dotyczą reprezentatywnych, dostarczonych do dalszych badań próbek paliwa)

PARAMETR	Ekodiesel ULTRA	RMD 80 „ECA Fuel”	RMG 380
Liczba cetanowa (dest.) / CCAI (Calculated Carbon Aromaticity Index) (pozost.)	51	791	756
Gęstość w 15°C, kg/m <sup>3</sup>	820	885	874,5
Lepkość kinematyczna w 40°C (dest.) / 50°C (pozost.), mm <sup>2</sup> /s	2,50	16,48	67,56
Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym w °C	56	102	296
Zawartość siarki % mass	poniżej 10 mg/kg	0,012	0,10

Produkowane w Szwecji, hybrydowe paliwo RMD 80 („ECA Fuel”) zostało tak skomponowane, aby przede wszystkim spełnić podstawowe wymagania IMO odnośnie paliw żeglugowych stosowanych na statkach operujących w wyznaczonych strefach tzw. SECA (ang.



*Sulphur Emission Control Area*), gdzie od 1 stycznia 2015 roku zawartość siarki w paliwie nie może przekraczać 0,1% na jednostkę masy [2,9,11]. Jego parametry fizykochemiczne przyjmują wartości pośrednie między wartościami charakterystycznymi dla paliw destylacyjnych i paliw pozostałościowych. Na przykład ma znacznie większą lepkość i smarność niż „destylaty” i wciąż wymaga podgrzewania przed podaniem do silnika, ale do temperatury o wiele niższej (do około 55-65 °C), niż to jest wymagane dla ciężkich paliw pozostałościowych podgrzewanych nawet do temperatury 150 °C. Z tego względu stosuje się je jako zamiennik dla tradycyjnych (zasiarczonych) paliw pozostałościowych przeznaczonych do zasilania silników okrętowych, jednak nie jest zalecane jego bezpośrednie stosowanie w układach zasilania silników przysposobionych tylko i wyłącznie do spalania paliw destylacyjnych. Układy te nie są standardowo wyposażane w wirówki, które musiałyby w sposób ciągły (i skuteczny) usuwać z paliwa hybrydowego twarde i drobne (rzędu kilku mikrometrów) cząstki krzemianu glinu, tzw. „cat fines”. Stanowią one nieuniknione pozostałości procesu krakingu katalitycznego, mającego na celu redukcję zawartości siarki w paliwie. Po wprowadzeniu nieoczyszczonego paliwa do silnika stają się przyczyną zwiększonego zużycia ściernego tulei cylindrowych, pierścieni tłokowych, pomp wtryskowych i wtryskiwaczy.

Paliwo RMG 380 oferowane przez koncern naftowy LOTOS również wychodzi naprzeciw nowym wyzwaniom dla transportu morskiego wynikającym z konieczności ograniczenia, a nawet całkowitego wyeliminowania obecności siarki w paliwie żegludowym. Stosuje się je do napędu silników z zapłonem samoczynnym i opalania kotłów używanych w żegludzie morskiej i śródlądowej. Spełnia wymagania kategorii ISO-F-RMG 380 wg normy PN-ISO 8217:2015-02. Otrzymywane jest w procesie tzw. hydrokrakingu, to jest krakingu katalitycznego realizowanego w obecności wodoru [3]. Głównym składnikiem (> 99,9% vol.) tego paliwa jest pozostałość z próżniowej destylacji frakcji węglowodorów pochodzących z procesu hydrokrakingu. Z uwagi na skład chemiczny paliwa, charakteryzuje się ono wysoką lepkością (> 25 cSt w 100°C), temperaturą zapłonu (> 250°C) oraz temperaturą płynięcia (> 18°C). Z drugiej strony jest praktycznie całkowicie pozbawione siarki (< 0,01%) oraz zanieczyszczeń stałych. Brak w paliwie frakcji lekkich typu olej napędowy MGO (ang. *Marine Gas Oil*) wywołuje potrzebę utrzymywania paliwa w temperaturach 60-90°C, w celu zapewnienia jego pompowności. Zawartość węglowodorów parafinowych (uzyskiwanych w procesie hydrokrakingu) powoduje konieczność filtrowania paliwa (w wirówkach) w temperaturze 80 °C i powyżej. Temperaturę, przy której paliwo osiąga lepkość 12 cSt wyznaczono na 135°C. I właśnie do takiej temperatury należy podgrzewać paliwo przed podaniem do komory spalania silnika okrętowego, aby uzyskać optymalne warunki procesu jego rozpylania, odparowania i spalania, a także optymalne warunki pracy aparatury wtryskowej, zwłaszcza par precyzyjnych pomp wtryskowych.

Jeżeli temperatura wtryskiwanego paliwa będzie za niska (lepkość zbyt duża), to podczas jego rozpylania tworzą się krople o dużych rozmiarach, a powstająca struga paliwa jest bardziej zwarta (kąąt strugi jest mniejszy) [1,4]. Wpływa to na pogorszenie warunków spalania, który staje się niecałkowity i niezupełny. W konsekwencji powstają osady zanieczyszczeń (nagar) na zaworach wylotowych i tłokach, którego obserwowalnym symptomem jest wzrost zanieczyszczeń stałych w oleju smarowym. Następuje wzrost intensywności zużycie ściernego węzłów trybologicznych całego silnika. Z drugiej strony największe krople niespalonego paliwa mogą osiągać ścianki cylindra i denko tłoka, spływając wraz z olejem smarowym do skrzyni korbowej. W konsekwencji olej smarowy traci zdolność do realizacji podstawowych zadań stawianych mu w silniku spalinowym, czego obserwowalnym symptomem jest spadek jego lepkości i temperatury zapłonu.

Dodatkowym skutkiem wzrostu lepkości paliwa jest wzrost oporów tarcia wewnętrznego w parach precyzyjnych, a także wzrost oporów przepływu przez rurociągi, filtry i inne elementy układu wtryskowego, ze wszystkimi dalszymi konsekwencjami dla osiągnięć i sprawności silnika.

Niepożądana jest również za wysoka temperatura paliwa (za mała lepkość), ponieważ staje się przyczyną innego mechanizmu powstawania zakłóceń procesu roboczego realizowanego w silniku okrętowym. Podczas rozpylania takiego paliwa tworzą się zbyt drobne krople, których energia

kinetyczna jest wytrącana zanim osiągną odległości gwarantujące równomierne wypełnienie całej komory spalania mieszaniną paliwowo-powietrzną. W takiej sytuacji strumień rozpylanego paliwa wypełnia tylko przestrzeń w pobliżu wtryskiwacza, gdzie występuje jego lokalny nadmiar i niecałkowite spalanie, z opisanymi powyżej konsekwencjami.

Nadmierne obniżenie lepkości paliwa może być również przyczyną utraty szczelności par precyzyjnych układu wtryskowego, a dodatkowo, spełniając rolę czynnika smarnego, może destrukcyjnie wpływać na ich trwałość (zwiększone zużycie adhezyjne). Przyjmuje się, że graniczna wartość lepkości kinematycznej, przy której paliwo traci zdolność do realizacji funkcji środka smarnego, wynosi 2 cSt.

Z powyższych względów w eksploatacji silników okrętowych zasilanych nowo wprowadzanymi na rynek żeglugowy, modyfikowanymi olejami pędnymi, o zróżnicowanej lepkości, możliwe są trzy metody optymalizacji procesu ich rozpylania w komorze spalania silnika:

- poprzez regulację ciśnienia wtrysku,
- odpowiedni dobór rozpylaczy (odpowiednia średnica i liczba otworków),
- poprzez regulację temperatury wtryskiwanego paliwa.

### 3. Technologia pomiaru ciepła spalania paliw żeglugowych

W celu oszacowania własności energetycznych rozpatrywanych paliw żeglugowych przeprowadzono pomiary ich ciepła spalania i obliczono wartości opałowe. Wyznaczona doświadczalnie wartość opałowa paliwa umożliwia precyzyjne obliczenie ilości energii chemicznej doprowadzanej do komory spalania badanego silnika, jako wielkości wejściowej dla dalszych analiz efektywności realizowanego procesu roboczego. Wartość opałowa paliwa ciekłego wyznaczana jest w kalorymetrze zgodnie z normą PN-86/C-04062 – „Przetwory naftowe. Oznaczanie ciepła spalania paliw ciekłych w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej”.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników pomiary wartości opałowej przedmiotowych paliw zostały przeprowadzone przez dwie niezależne instytucje: laboratorium Katedry Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej oraz laboratorium paliwowe przedsiębiorstwa LOTOS Asphalt Sp. z o.o.<sup>1</sup>.

Pomiary zrealizowane w Politechnice Gdańskiej przeprowadzono przy zastosowaniu kalorymetru IKA C200 – rys. 1. Jest to jedna z popularniejszych wersji kalorymetrów niemieckiego producenta IKA WERKE GmbH, który powstał z myślą o laboratoriach szkolnych, technicznych, uniwersyteckich, przemysłowych itp., gdzie jest liczba wykonywanych pomiarów jest stosunkowo niewielka [10].

Z kolei do pomiarów ciepła spalania tych samych paliw w laboratorium Lotosu zastosowano inną, nowszą i znacznie bardziej zaawansowaną technologicznie, wersję kalorymetru tego samego producenta – IKA C6000 (rys. 2).

Dodatkowym celem zleczanych badań paliwowych, było wstępne oszacowanie ilościowe i jakościowe produktów pozostałościowych po spaleniu próbki paliwowej w tyglu bomby kalorymetrycznej – rys. 3. Daje to pewien obraz czego można się spodziewać w komorze spalania silnika doświadczalnego, po zastosowaniu nowego rodzaju paliwa zasilającego. Jak widać na rysunku 3c w przypadku paliwa RMG 380 ilość pozostałego w tyglu nagaru była dyskwalifikująca, a dodatkowo mimo wielokrotnie podejmowanych prób (również przy wspomaganie procesu spalania kwasem benzoowym) nie udało się wyznaczyć jego wartości opałowej. Początkowo sądzono, że paliwo jest silnie zanieczyszczone. Jednak jego ponowne oczyszczenie w wirówce nie przyniosło oczekiwanych rezultatów.

Sytuacja wyjaśniła się dopiero podczas badań tego samego paliwa w laboratorium Lotosu, gdzie ciśnienie tlenu doprowadzanego do bomby kalorymetrycznej było blisko dwukrotnie wyższe

<sup>1</sup> W dalszej części opracowania jest ono nazywane również krócej „laboratorium Lotosu”.

– rys. 4. Natomiast ilość nagaru znajdującego się w tyglu bomby kalorymetrycznej po przeprowadzonym badaniu była znikoma – rys. 3d. Oznacza to, że spalanie próbki paliwa w kalorymetrze było całkowite, w przeciwieństwie do badania przeprowadzonego w laboratorium Politechniki Gdańskiej.

a)



b)



Rys. 1. Widok ogólny kalorymetru IKA C200 na stanowisku laboratoryjnym Katedry Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego Wydziału Chemicznego Politechniki Gdańskiej (a), zbliżenie panelu sterowniczego (b)

a)



b)



Rys. 2. Widok ogólny kalorymetru IKA C6000 na stanowisku laboratoryjnym przedsiębiorstwa LOTOS Asfalt Sp. z o.o (a), zbliżenie panelu sterowniczego (b)





Rys. 3. Tygły bomb kalorymetrycznych z pozostałościami produktów spalania:  
 a) Ekodiesel ULTRA (laboratorium Politechniki Gdańskiej), b) „ECA Fuel” RMD 80 (laboratorium Politechniki Gdańskiej), c) RMG 380 (laboratorium Politechniki Gdańskiej), d) RMG 380 (laboratorium Lotosu)

Laboratorium Politechniki Gdańskiej

Laboratorium Lotosu



Rys. 4. Zawór redukcyjny zbiornika ciśnieniowego z tlenem zasilającym kalorymetr – wskazania ciśnienia tlenu na manometrach

Ostatecznie do dalszych analiz energetycznych przyjęto następujące wartości opałowej badanych paliw żeglugowych:

- Olej napędowy Ekodiesel ULTRA - 42,44 MJ/kg
- Paliwo hybrydowe „ECA Fuel” RMD 80 - 41,97 MJ/kg
- Paliwo pozostałościowe RMG 380 - 43,24 MJ/kg

#### 4. Uwagi i wnioski końcowe

Przedstawiona w artykule charakterystyka modyfikowanych paliw żeglugowych, które stosowane są obecnie do zasilania silników okrętowych, wskazuje na konieczność rozwiązania kilku kluczowych problemów eksploatacyjnych związanych z ich użytkowaniem, tak aby zapewnić gwarantowaną przez producenta trwałość i niezawodność działania. Na pierwsze miejsce wysuwa się problem odpowiedniego doboru temperatury paliwa wtryskiwanego do komory spalania silnika, zapewniającego optymalną geometrię i strukturę rozpylanej strugi. Kolejną trudność stanowi może precyzyjne wyznaczenie wartości opałowej paliw pozostałościowych dla oszacowania osiągnięć i sprawności energetycznej zasilanych silników. Zwrócono również uwagę na możliwość wstępnego, jakościowego i ilościowego, oszacowania produktów spalania próbki takiego paliwowej w tyglu bomby kalorymetrycznej, przed wprowadzeniem go do układu zasilania użytkowanego silnika.

## Literatura

- [1] Balawender K., Kuszewski H., Lejda K., Lew K.: Badania wizualizacyjne jako metoda oceny parametrów wtrysku paliwa do silników o ZS. Eksploatacja i testy. Autobusy 6/2016.
- [2] Brynolf S., Magnusson, M., Fridell, E. Andersson, K.: Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 28, 2014.
- [3] Chmielniak T.: Technologie energetyczne. WNT, Warszawa 2008.
- [4] Idzior M., Lijewski P.: Possibilities of description of spraying fuel quality with SI engines injectors with investigation method of the stream parameters of atomizing fuel. Journal of KONES Internal Combustion Engines No. 3-4/2002.
- [5] Korczewski Z. i inni: Budowa stanowiska laboratoryjnego do badania innowacyjnej metody suchej odsiarczania spalin silnika zasilanego paliwem pozostałościowym. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-01/2015. Politechnika Gdańska 2016.
- [6] Korczewski Z. i inni: Metoda oceny ekologicznych, energetycznych i niezawodnościowych skutków stosowania modyfikowanych paliw żeglugowych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym w warunkach rzeczywistych. Dokumentacja techniczna. Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej wykonanej w ramach projektu finansowanego przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Morskiej w Gdańsku. Nr projektu RX-10/2017. Politechnika Gdańska 2017.
- [7] Korczewski Z., Marszałkowski K., Rudnicki J.: The concept of research on ecological, energetical and reliability effects of modified marine fuel oils usage to supply compression ignition engines in real conditions. Combustion Engines, 4/2017 (171), CE-2017-410, p. 56-61.
- [8] Korczewski Z., Rudnicki J., Zadrag R.: Laboratory station for research of the innovative dry method of exhaust gas desulfurization for an engine powered with residual fuel. Combustion Engines, 1/2017 (168), CE-2017-105, p. 32-37.
- [9] Tamm E.: Discussion about the use of marine fuel in the baltic sea and north sea eca and how refineries have been affected by the marine sulphur regulation. The 18th of April 2016 with Ebba Tamm, SPBI.
- [10] [www.ika.com](http://www.ika.com) (3.11.2016 r.).
- [11] [www.stenaoil.com](http://www.stenaoil.com) (3.11.2017 r.).