



## PROTOTYPOWE STANOWISKO LABORATORYJNE DO OCENY WŁASNOŚCI MODYFIKOWANYCH PALIW ŻEGLUGOWYCH W ZAKRESIE ICH WPŁYWU NA WSKAŹNIKI PRACY SILNIKA

**Jacek Rudnicki**

*Politechnika Gdańska*  
*Ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, Polska*  
*Tel.: +48 58 3472773, fax: +48 58 3472430*  
*e-mail: [jacekrud@pg.edu.pl](mailto:jacekrud@pg.edu.pl)*

### Abstract

*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 żeglugowym, w tym zasiarczonych 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[1, 2, 4]. W referacie przedstawiono wyniki badań wstępnych, których celem była ocena przydatności zmodernizowanego stanowiska hamownianego silnika szybkoobrotowego z zapłonem samoczynnym do prowadzenia wspomnianych badań z zastosowaniem skrajnie różnych paliw żeglugowych.*

**Keywords:** paliwa pozostałościowe, indykowanie silnika, analiza porównawcza

### 1. Wprowadzenie

Konkurencja na rynku paliw żeglugowych, dynamika zmian ich cen oraz zaostrzające się w zakresie emisji toksycznych składników spalin wymogi formalno – prawne [5] powodują, że podaż tych paliw ulega ciągłym przeobrażeniom. Przykładem może być chociażby najnowsza edycja normy ISO 8217 (ISO 8217:2017 Sixth edition), w której wprowadzono kolejne oznaczenie, mianowicie DF (distillate FAME - Fatty Acid Methyl

Ester, paliwa DFA, DFZ i DFB), charakteryzujące się zawartością estru metylowego kwasu tłuszczowego maksymalnie do 7% objętości paliwa, przy czym wcześniej FAME był uznawany za zanieczyszczenie we wszystkich paliwach okrętowych.

Sytuacja taka powoduje, że istnieje konieczność wstępnych badań laboratoryjnych wpływu różnego rodzaju modyfikowanych paliw na osiągi i trwałość podstawowych węzłów silnika, badań poprzedzających eksperymenty w skali rzeczywistej na obiektach w eksploatacji.

Ze względu na duży popyt na usługi tego rodzaju, w szczególności dotyczące tzw. „paliw ciężkich” w Katedrze Siłowni Morskich i Lądowych Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej, w wyniku prowadzonych badań wykonano projekt oraz prototyp instalacji paliwowej silnika laboratoryjnego, która umożliwia 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. Aby zrealizować zakładane cele badawcze, konieczne było odwzorowanie, w odpowiedniej skali, cech konstrukcyjnych i funkcjonalnych rzeczywistej instalacji zasilania paliwem pozostałościowym silnika okrętowego [3].

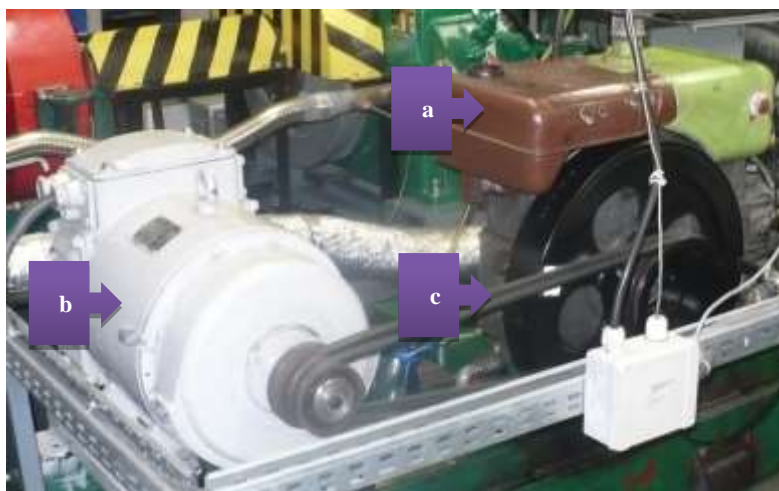
## 2. Opis stanowiska hamownianego

Podstawowym elementem stanowiska jest czterosurowy silnik o zapłonie samoczynnym silnik Farymann Diesel D10. Silnik ten jest niedoładowanym, jednocylindrowym silnikiem z wtryskiem paliwa do wstępnej, wirowej komory spalania, chłodzony wodą przez odparowanie, o mocy znamionowej 6 kW rozwijanej przy prędkości obrotowej 1500 obr/min

Instalacja paliwowa w części wysokociśnieniowej składa się z pompy wtryskowej Bosch, wtryskiwacza z rozpylaczem czopikowym (ciśnienie wtrysku 10 MPa) oraz przewodu wtryskowego.

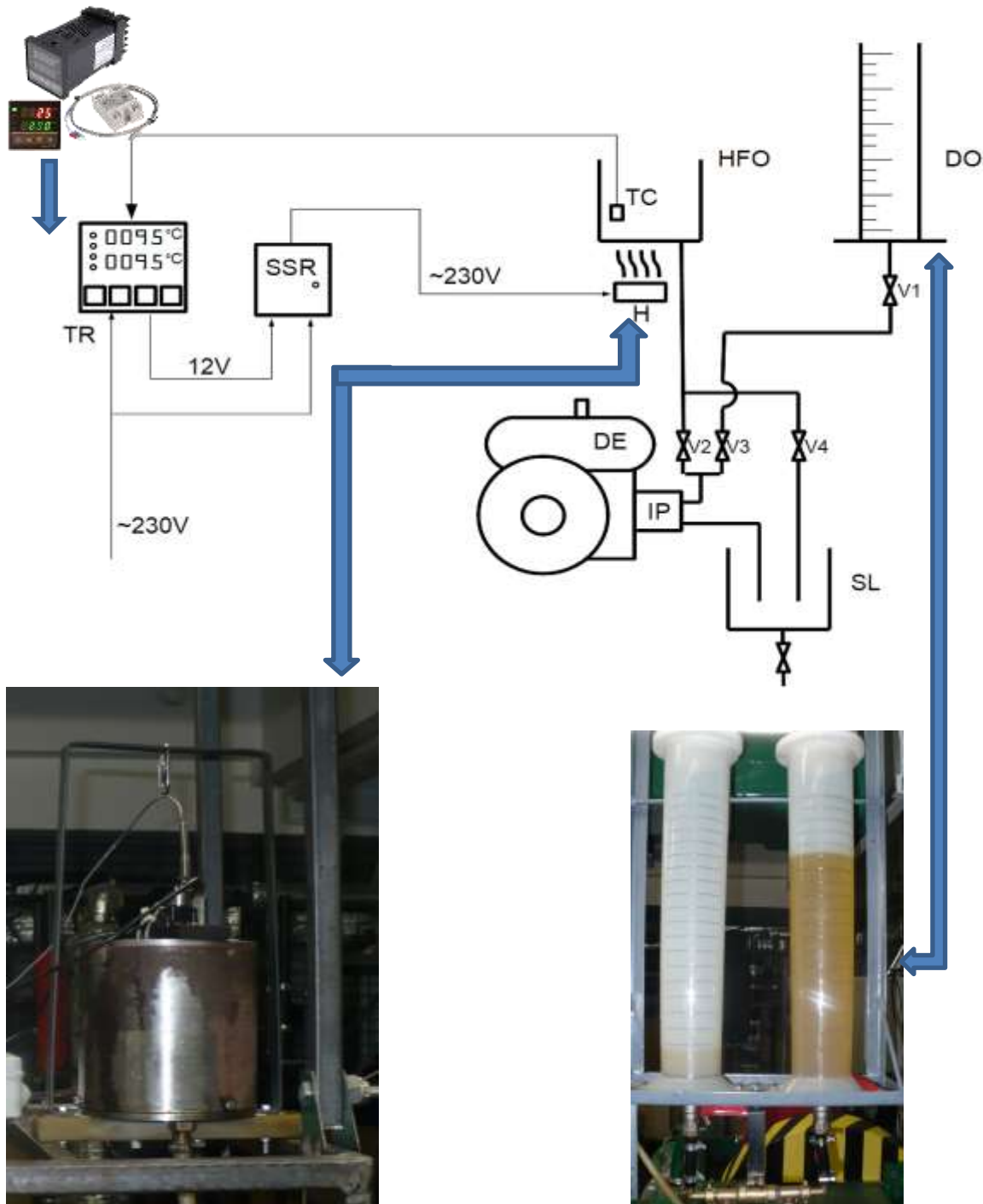
Silnik posiada wkręcaną w głowicę cylindrową obsadę papieru zapłonowego. Otwór wkręcanej obsady papieru zapłonowego posiada nacięty gwint M14x1,25, który wykorzystany jest do montażu kurka indykatorowego.

Silnik ZS Farryman Diesel D10 obciążany jest przy użyciu prądnicy prądu stałego typu PKM0a44a/143 produkcji Zakładów Okrętowych Urządzeń Elektrycznych. Prądnica jest napędzana przez silnik poprzez przekładnię pasową o przełożeniu  $p \approx 2:1$ .



Rys. 1 Stanowisko laboratoryjne zespołu napędowego z silnikiem Farymann Diesel D10 (a) obciążanego poprzez przekładnię pasową (c) prądnicą prądu stałego typu PKM0a44a/143 (b)

W celu realizacji założonych procedur badawczych [6] istotnej modyfikacji poddano układ paliwowy silnika. Układ ten w pierwotnej wersji zabudowany na silniku i stanowiący jego integralną część został wydzielony jako odrębny moduł funkcjonalny, którego schemat oraz widok wybranych elementów przedstawiony został na rys. 2.



Rys. 2 Schemat blokowy instalacji paliwowej stanowiska badawczego paliw żeglugowych.

TR – elektroniczny termoregulator, SSR – przekaźnik półprzewodnikowy, TC – termopara typu K, H – elektryczny podgrzewacz o mocy 1,2kW, HFO – zbiornik rozchodowy na badane paliwo pozostałościowe, DO – zbiornik z paliwem destylacyjnym (olej napędowy), DE – badawczy silnik spalinowy Farymann typu D10, IP – pompa wtryskowa, SL – zbiornik szlamu, V1 ÷ V4 – zawory linii paliwowej

Badanie z wykorzystaniem paliw pozostałościowych wymaga każdorazowo podgrzania odwirowanej i przefiltrowanej uprzednio próbki paliwa w ilości 1dm<sup>3</sup> w zbiorniku rozchodowym HFO (rys. 2). Temperatura, a także pośrednio lepkość paliwa znajdującego się w tym zbiorniku, jest stabilizowana precyzyjnym termostatem elektronicznym typu C100 FK02-V\*AN firmy RKC INSTRUMENT INC z regulacją PID. Regulacja temperatury opiera się na pracy impulsowej termostatu, której elementem wykonawczym (zasilającym grzałkę podgrzewacza) jest przekaźnik półprzewodnikowy SSR-16DA firmy MNXCN o maksymalnym prądzie przewodzenia 16 A.

Dodatkowo stanowisko zostało wyposażone w cztery cyfrowe czujniki temperatury DS18B20 z interfejsem 1-wire o zakresie pomiarowym od -55 °C do 125 °C (dokładność: +/- 0,5 °C w zakresie -10 °C do 85 °C) umożliwiające pomiar tej wielkości w następujących punktach:

- Temperatura oleju smarowego w skrzyni korbowej silnika;
- Temperatura wody chłodzącej w zbiorniku wyrównawczym silnika;
- Temperatura paliwa w zbiorniku HFO (rys. 2);
- Temperatura wody w zbiorniku grzałek G1, G2 (rys. 2).

Realizacja badań na opisanym stanowisku została przeprowadzona z użyciem następującej dodatkowej aparatury pomiarowej:

• **Indykator elektroniczny LEMAG Premet C XL**

Indykator elektroniczny LEMAG Premet C XL niemieckiej firmy LEHMANN & Michels GmbH, którego zdjęcie umieszczono na rysunku 3. Urządzenie to jest wyposażone w oprogramowanie WPREMET umożliwiające analizę uzyskanych wyników.

a)

b)



Rys. 3 Indykator elektroniczny LEMAG PREMETS® C. a) widok indykatora, b) indykator zamontowany na silniku Farymann Diesel D10

### •Miernik drgań SVAN 956

Cyfrowy rejestrator i analizator drgań typu SVAN 956 wyposażony w piezoelektryczny czujnik akcelerometryczny typu SVANTEK SV 80. Miernik posiada trzy profile pomiarowe za pomocą których użytkownik jest w stanie wykonać jednocześnie trzy pomiary z zastosowaniem różnych filtrów, a także z ustawieniem różnych stałych czasowych. Oznacza to, iż można jednocześnie mierzyć prędkość, przyspieszenie i przemieszczenie drgań. Bardzo ważną funkcją miernika jest możliwość wykonania w czasie rzeczywistym analizy z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera ( analiza FFT), a także analizy w pasmach oktaowych i tercjowych. Zakres częstotliwości wykonywanych pomiarów mieści się w przedziale od 0,5 kHz do 20 kHz.



Rys. 4 Cyfrowy rejestrator i analizator drgań typu SVAN 956

### 3. Charakterystyka badanych 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: RMD 80 i RMG 380.

Tab. 1 Podstawowe własności fizykochemiczne paliw żeglugowych wytypowanych do badań

PARAMETR	Ekodiesel ULTRA	RMD 80	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

W celu oszacowania własności energetycznych rozpatrywanych paliw żeglugowych przeprowadzono pomiary ich ciepła spalania i obliczono wartości opałowe. Wartość opałowa



paliwa ciekłego wyznaczana została w kalorymetrze zgodnie z normą PN-86/C-04062 – „Przetwory naftowe. Oznaczanie ciepła spalania paliw ciekłych w bombie kalorymetrycznej i obliczanie wartości opałowej”.

W wyniku przeprowadzonych pomiarów przyjęto następujące wartości opałowej badanych paliw żeglugowych:

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

#### **4. Ocena przydatności stanowiska do badania efektywności energetycznej paliw żeglugowych**

Badania przeprowadzono w czterech zasadniczych etapach:

Etap I – wstępne badania symulacyjne z wykorzystaniem dedykowanego narzędzia programowego Diesel RK, celem określenia potencjalnych, niepożądanych skutków zasilania silnika szybkoobrotowego paliwem pozostałościowym w zakresie jego obciążeń cieplno – mechanicznych oraz podjęcia ewentualnych środków zapobiegawczych.

Etap II – badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego, typowym dla silników szybkoobrotowych, paliwem destylacyjnym (w tym przypadku Ekodiesel ULTRA - PKN ORLEN S.A.). Badania te miały na celu ustalenie wartości wybranych wskaźników stanu referencyjnego w odniesieniu do którego została przeprowadzona analiza porównawcza, dotycząca przebiegu procesu spalania w czasie zasilania silnika paliwami RMD 80 i RMG 380.

Etap III – badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego paliwem RMD 80.

Etap IV – badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego paliwem RMG 380.

W czasie każdego z etapów badań laboratoryjnych zrealizowane zostały następujące pomiary:

- Indykowanie cylindra silnika (pomiar ciśnień wewnątrzcyldrowych) dla określenia wartości:
  - wskaźników jakościowych zamiany energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną tzn. wartości mocy indykowanej i średniego ciśnienia indykowanego;
  - wskaźników charakteryzujących obciążenia mechaniczne układu tłokowo – korbowego tzn. maksymalnego ciśnienia spalania i stopnia przyrostu ciśnienia w czasie spalania;
  - wskaźników charakteryzujących poprawność przebiegu spalania tzn. kąta wystąpienia maksymalnego ciśnienia spalania oraz ciśnienia końca spalania (ciśnienie rozprężania  $36^\circ$  za GMP)
- Pomiar prędkości drgań na fundamencie – w celu pośredniego określenia ilości rozpraszanej energii na wymuszanie drgań, co może być traktowane jako wskaźnik stabilności układu (silnika) podczas pracy na różnych rodzajach paliwa. Pomiary przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy ISO 10816 [7] („Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts”) tzn. określono wartość skuteczną RMS prędkości drgań z zastosowaniem filtra średnioprzepustowego 10Hz–1kHz;
- Pomiar zużycia paliwa – w celu określenia bilansu energetycznego silnika. Pomiar dokonany został poprzez określenie objętości zużytego paliwa w czasie takiego samego czasu na dwóch ustalonych obciążeniach silnika.

#### 4.1. Symulacyjne badania wstępne

Do badań zastosowano program symulacyjny DIESEL-RK. Jest to oprogramowanie do symulacji cyklu termodynamicznego silnika. Jest on przeznaczony do symulacji oraz optymalizacji procesów roboczych dwu- i czterosuwowych silników spalinowych. Zastosowane założenia i metody obliczeń (min.: model matematyczny wymiany gazowej uwzględnia niestacjonarne przepływy gazów, proces rozpylania i spalania opisywany jest modelem wielostrefowym) sprawiają, że uzyskiwane wyniki cechuje duża wiarygodność. Potwierdzeniem tego poglądu może być lista referencyjna użytkowników, na której znajdują się min. firmy i instytucje takie jak: General Motors – USA, Wartsila, Robert Bosch GmbH, JSC "Zvezda" (St. Petersburg) i inne.

Praca z programem zrealizowana została w następujących etapach:

Etap Is – implementacja modelu silnika Farymann w programie Diesel RK,

Etap IIs – założenie warunków badań symulacyjnych, wybór wskaźników podlegających ocenie

Etap IIIs – przeprowadzenie symulacji dla stanu referencyjnego – silnik zasilany paliwem Ekodiesel ULTRA - PKN ORLEN S.A.,

Etap IVs - przeprowadzenie symulacji dla stanu I – silnik zasilany paliwem o własnościach będących średnimi wartościami rozpatrywanych paliw „ECA Fuel” RMD 80 i RMG 380. Taki sposób realizacji tego etapu wynikał z założenia, że uzyskane wyniki należy traktować wyłącznie w kategoriach jakościowych (względnych) w odniesieniu do stanu referencyjnego. Tym samym założono, że nie są najistotniejsze wartości uzyskanych wyników lecz trendy ich zmian, które mogą wskazać istniejące zagrożenia dla funkcjonowania silnika podczas pracy na nietypowym dla niego paliwie

Etap VIs – analiza porównawcza uzyskanych wyników

Uzyskane podczas przeprowadzonych symulacji wyniki skłaniają do sformułowania następujących wniosków:

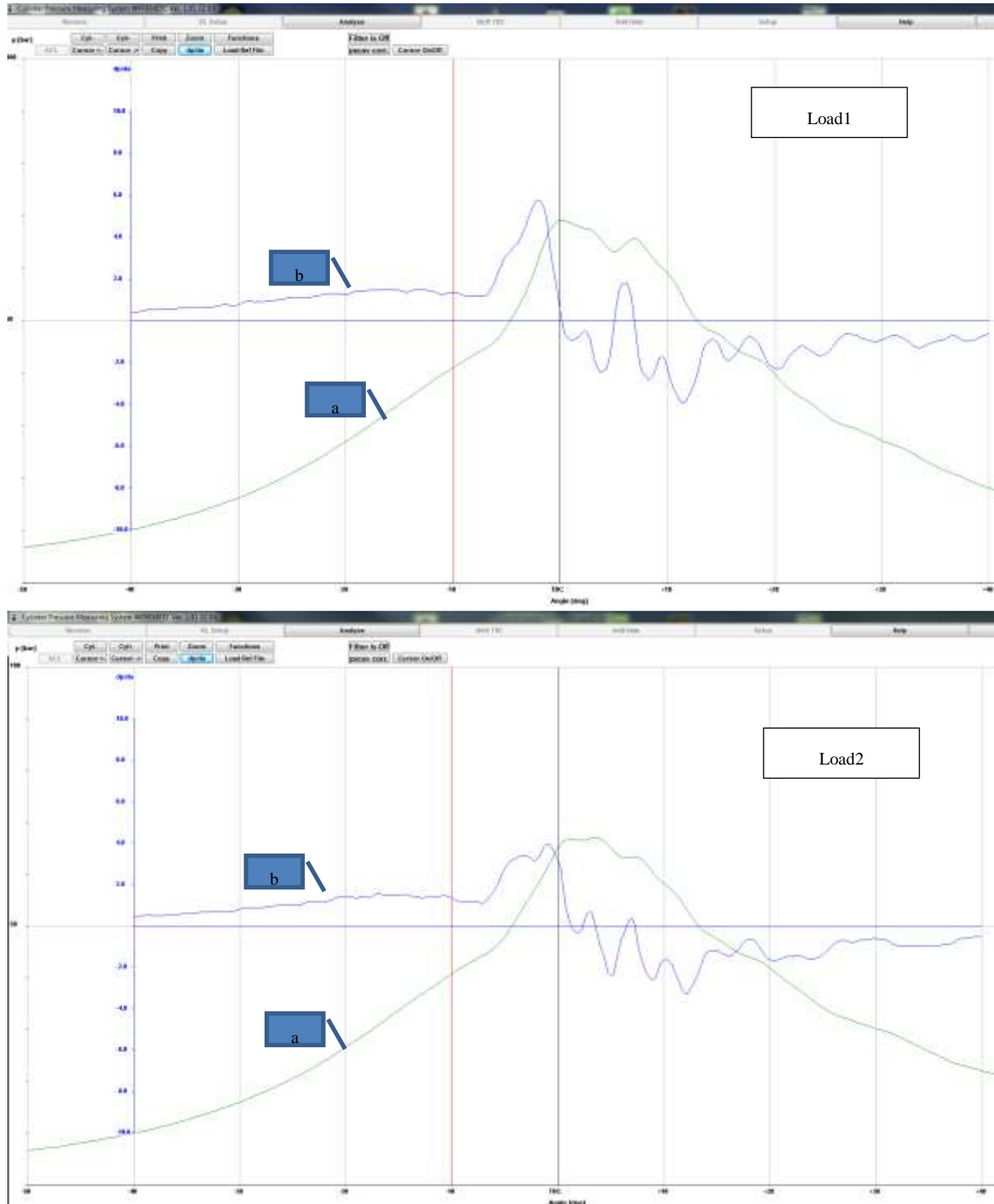
- Zgodnie z oczekiwaniami zwłoka zapłonu podczas zasilania silnika paliwem pozostałościowym ulega znaczącemu wydłużeniu – około dwukrotnie;
- Stwierdzony wyżej fakt wpływa tym samym na zwiększenie twardości pracy silnika (wzrost wskaźnika  $dp/d\alpha$ ) niosąc ze sobą ryzyko nadmiernych obciążeń dynamicznych łożysk układu tłokowo – korbowego;
- Zasilanie silnika paliwem pozostałościowym nie wpływa istotnie na maksymalne wartości ciśnień i temperatury wewnątrz cylindra oraz temperaturę elementów bezpośrednio ograniczających komorę spalania;
- Ze względu na uzyskane podczas tego etapu badań wyniki należy podczas pilotażowych badań eksperymentalnych ograniczyć obciążenie silnika do ok. maksymalnie 50% i w takich warunkach dokonać weryfikacji wniosków sformułowanych na podstawie badań symulacyjnych. Dodatkowo ze względu na wydłużający się wraz ze zwiększaniem prędkości obrotowej czas spalania (wyrażony w stopniach obrotu wału korbowego) należy ograniczyć prędkość obrotową silnika do założonych wstępnie ok 1200 obr./min.

## 4.2. Badania eksperymentalne i ich wyniki

### • Badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego paliwem destylacyjnym Ekodiesel ULTRA - PKN ORLEN S.A.

#### 1. Warunki i wyniki indykowania silnika

- obciążenie silnika Load1  $\approx 1300$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1260$  obr/min
- obciążenie silnika Load2  $\approx 3000$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1200$  obr/min



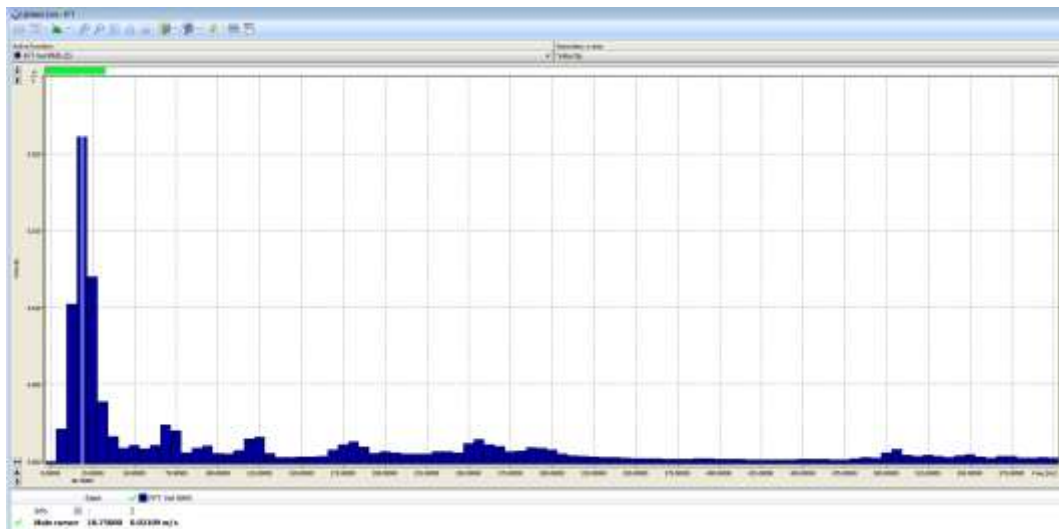
Rys. 5 Zmiany ciśnienia wewnątrzcyldrowego (a) oraz stopnia przyrostu ciśnienia (b) – wynik indykowania cylindra



2. Wyniki pomiaru RMS prędkości i przyspieszenia drgań - obciążenie silnika  $L \approx 3000$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1200$  obr/min

Tab. 2 Wyniki pomiaru RMS prędkości i przyspieszenia drgań

Main results for vibration							
Day	Hour	Filter	Units	Peak	P-P	Max	RMS
yyyy-MM-dd	HH:mm:ss						
2017-11-02	11:47:44	VelMF	m/s	0,056234	0,110917	0,023988	0,022646
2017-11-02	11:47:44	HP1	m/s <sup>2</sup>	298,5383	568,8529	39,81072	35,07519



Rys. 6 Widmo RMS prędkości drgań

3. Wyniki pomiaru zużycia paliwa

Zużycie paliwa przez silnik określono poprzez wyznaczenie objętości początkowej w zbiorniku pomiarowym, ustaleniu obciążenia silnika i jego funkcjonowanie w tym stanie przez określony czas ( $t = 30$  minut) a następnie odczytanie objętości końcowej w zbiorniku pomiarowym. Jednoczesny pomiar temperatury paliwa pozwolił na wprowadzenie korekty związanej z zależnością jego gęstości od tej wielkości. Warunki wykonywania pomiaru i uzyskane wartości zestawiono w tab. 3.

Tab. 3 Wyniki pomiaru zużycia paliwa i wskaźników pochodnych

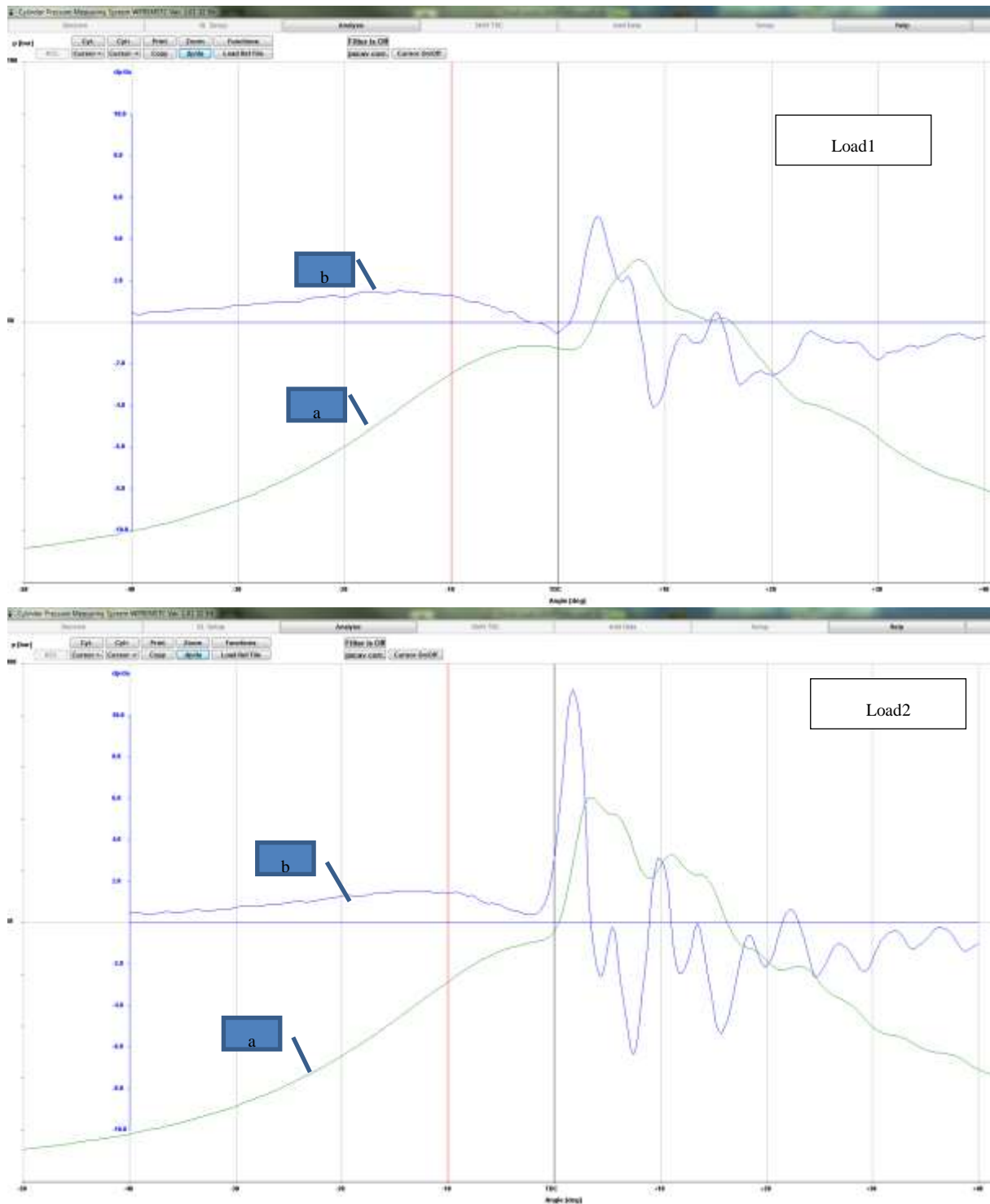
Wartość opałowa dolna paliwa	Prąd obciążenia prądnicy	Napięcie na zaciskach prądnicy	Objętość początkowa paliwa	Objętość końcowa paliwa	Temperatura paliwa	Gęstość
[MJ/kg]	[A]	[V]	[ml]	[ml]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]
42,44	12,5	170	1680	1140	19	820
Zużyta masa paliwa	Godzinowe zużycie paliwa	Jednostkowe zużycie paliwa	Skorygowane jednostkowe zużycie paliwa <sup>1</sup>	Sprawność ogólna silnika		
[kg]	[kg/h]	[kg/kWh]	[kg/kWh]	[-]		
0,4428	0,8856	0,417	0,414	0,204		

<sup>1</sup> – korekta dla paliwa umownego o  $W_d = 42,7$  MJ/kg

• **badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego paliwem RMD 80**

1. Warunki i wyniki indykowania silnika

- obciążenie silnika Load1  $\approx 1300$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1260$  obr/min
- obciążenie silnika Load2  $\approx 2600$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1280$  obr/min

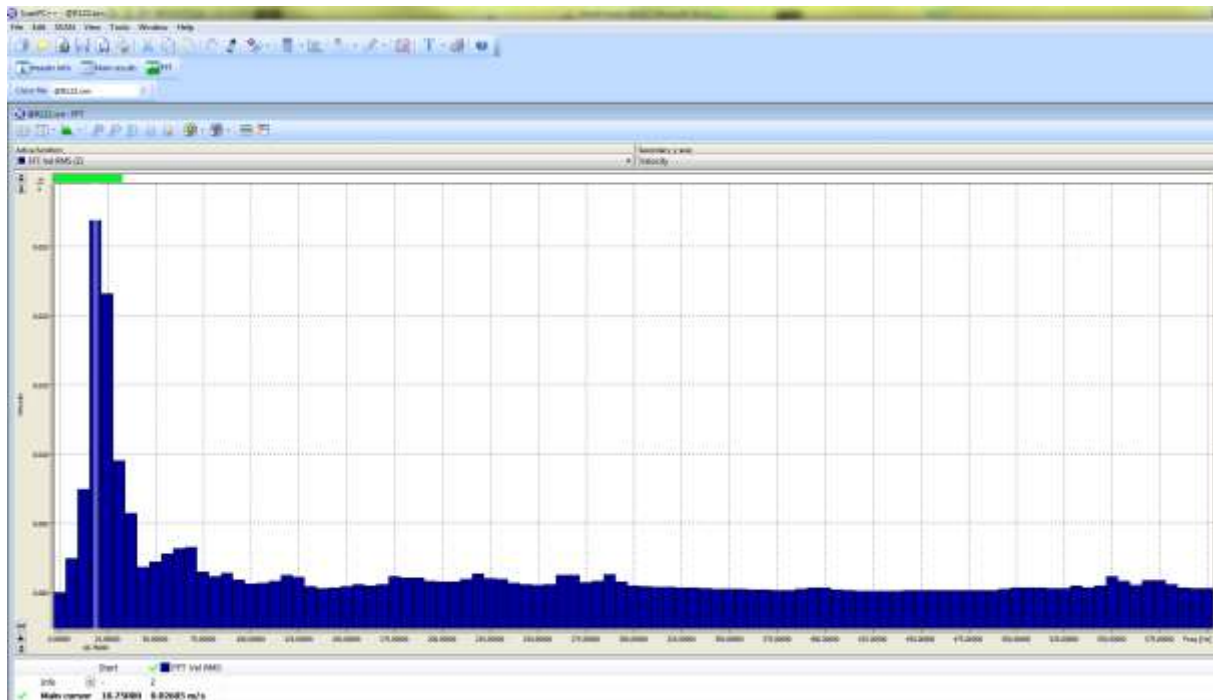


Rys. 7 Zmiany ciśnienia wewnątrzcyldrowego (a) oraz stopnia przyrostu ciśnienia (b) – wynik indykowania cylindra

2. Wyniki pomiaru RMS prędkości drgań - obciążenie silnika  $L \approx 2600$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1280$  obr/min

Tab. 4 Wyniki pomiaru RMS prędkości i przyspieszenia drgań

Main results for vibration							
Day	Hour	Filter	Units	Peak	P-P	Max	RMS
yyyy-MM-dd	HH:mm:ss						
2017-07-18	13:02:00	VelMF	m/s	0,089125	0,156675	0,033497	0,031261
2017-07-18	13:02:00	HP1	m/s <sup>2</sup>	518,8	988,5531	53,08844	42,65795



Rys. 8 Widmo RMS prędkości drgań

3. Wyniki pomiaru zużycia paliwa

Tab. 5 Wyniki pomiaru zużycia paliwa i wskaźników pochodnych

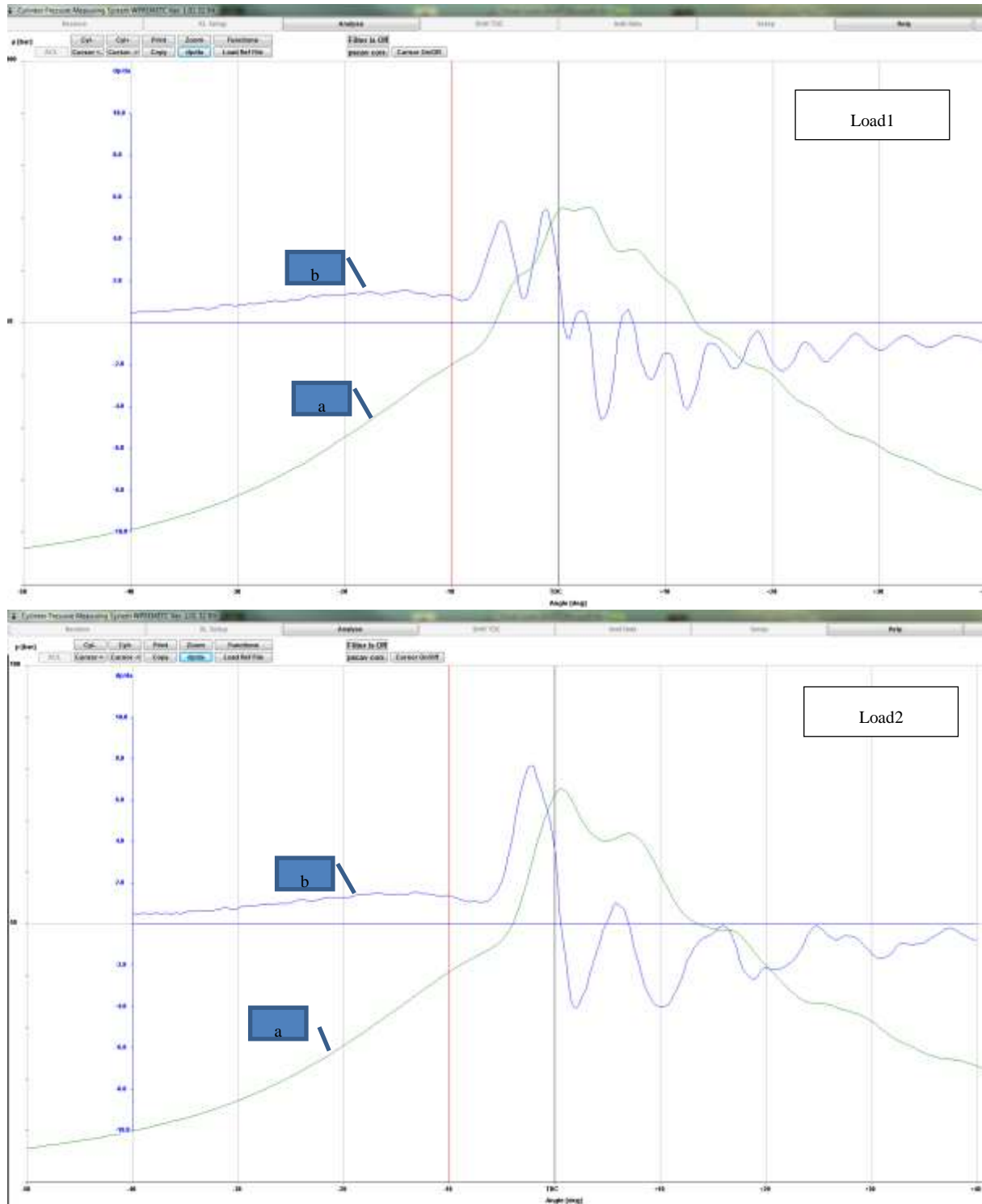
Wartość opałowa dolna paliwa	Prąd obciążenia prądnicy	Napięcie na zaciskach prądnicy	Objętość początkowa paliwa	Objętość końcowa paliwa	Temperatura paliwa	Gęstość
[MJ/kg]	[A]	[V]	[ml]	[ml]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]
41,97	12,5	170	786	225	80	840
Zużyta masa paliwa	Godzinowe zużycie paliwa	Jednostkowe zużycie paliwa	Skorygowane jednostkowe zużycie paliwa <sup>1</sup>	Sprawność ogólna silnika		
[kg]	[kg/h]	[kg/kWh]	[kg/kWh]	[-]		
0,471	0,943	0,443	0,436	0,193		

<sup>1</sup> – korekta dla paliwa umownego o  $W_d = 42,7$  MJ/kg

• **Badania na stanowisku laboratoryjnym silnika zasilanego paliwem RMG 380**

1. Warunki i wyniki indykowania silnika

- *obciążenie silnika Load1  $\approx 1400$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1260$  obr/min*
- *obciążenie silnika Load2  $\approx 3000$  W, prędkość obrotowa  $n \approx 1200$  obr/min*



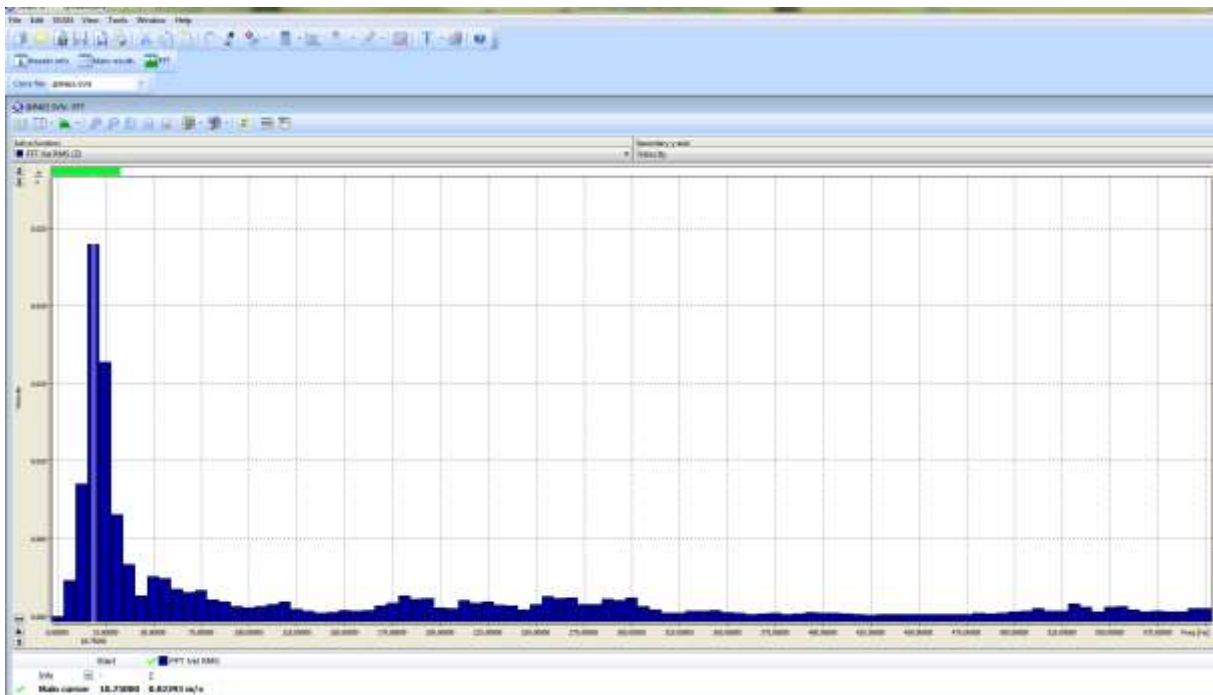
Rys. 9 Zmiany ciśnienia wewnątrzcyldrowego (a) oraz stopnia przyrostu ciśnienia (b) – wynik indykowania cylindra

2. Wyniki pomiaru RMS prędkości drgań - obciążenie silnika  $L \approx 3000\text{ W}$ , prędkość obrotowa  $n \approx 1200\text{ obr/min}$

Tab. 6 Wyniki pomiaru RMS prędkości i przyspieszenia drgań

Main results for vibration

Day	Hour	Filter	Units	Peak	P-P	Max	RMS
yyyy-MM-dd	HH:mm:ss						
2017-09-14	11:37:24	VelMF	m/s	0,08414	0,141254	0,028184	0,026303
2017-09-14	11:37:24	HP1	m/s <sup>2</sup>	484,1724	954,9926	45,18559	38,01894



Rys. 10 Widmo RMS prędkości drgań

3. Wyniki pomiaru zużycia paliwa

Tab. 7 Wyniki pomiaru zużycia paliwa i wskaźników pochodnych

Wartość opałowa dolna paliwa	Prąd obciążenia prądnicy	Napięcie na zaciskach prądnicy	Objętość początkowa paliwa	Objętość końcowa paliwa	Temperatura paliwa	Gęstość
[MJ/kg]	[A]	[V]	[ml]	[ml]	[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]
43,24	12,5	170	820	220	90	827
Zużyta masa paliwa	Godzinowe zużycie paliwa	Jednostkowe zużycie paliwa	Skorygowane jednostkowe zużycie paliwa <sup>1</sup>	Sprawność ogólna silnika		
[kg]	[kg/h]	[kg/kWh]	[kg/kWh]	[-]		
0,495	0,991	0,467	0,472	0,179		

<sup>1</sup> – korekta dla paliwa umownego o  $W_d = 42,7\text{ MJ/kg}$

Obciążenie – Load 1		Obciążenie – Load 2																																																													
<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>2</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>70.1 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>70.1 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>0.00 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>21.3 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1254 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>3.9 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>4 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>4.3 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>41.2 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	2	ptdc :	70.1 [bar]	pmax :	70.1 [bar]	apmax :	0.00 [deg]	pexp :	21.3 [bar]	rpm :	1254 [1/min]	mip :	3.9 [bar]	pind :	4 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	4.3 [deg]	pcur :	41.2 [bar]	acur :	-10.00 [deg]	<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>2</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>64.9 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>67.1 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>3.75 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>24.8 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1205 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>6.7 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>7 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>4.5 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>40.8 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	2	ptdc :	64.9 [bar]	pmax :	67.1 [bar]	apmax :	3.75 [deg]	pexp :	24.8 [bar]	rpm :	1205 [1/min]	mip :	6.7 [bar]	pind :	7 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	4.5 [deg]	pcur :	40.8 [bar]	acur :	-10.00 [deg]
Cyl :	2																																																														
ptdc :	70.1 [bar]																																																														
pmax :	70.1 [bar]																																																														
apmax :	0.00 [deg]																																																														
pexp :	21.3 [bar]																																																														
rpm :	1254 [1/min]																																																														
mip :	3.9 [bar]																																																														
pind :	4 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	4.3 [deg]																																																														
pcur :	41.2 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Cyl :	2																																																														
ptdc :	64.9 [bar]																																																														
pmax :	67.1 [bar]																																																														
apmax :	3.75 [deg]																																																														
pexp :	24.8 [bar]																																																														
rpm :	1205 [1/min]																																																														
mip :	6.7 [bar]																																																														
pind :	7 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	4.5 [deg]																																																														
pcur :	40.8 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Paliwo Ekodiesel ULTRA - PKN ORLEN S.A.																																																															
<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>2</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>45.0 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>62.0 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>7.75 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>20.5 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1215 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>3.8 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>4 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>4.3 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>40.2 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	2	ptdc :	45.0 [bar]	pmax :	62.0 [bar]	apmax :	7.75 [deg]	pexp :	20.5 [bar]	rpm :	1215 [1/min]	mip :	3.8 [bar]	pind :	4 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	4.3 [deg]	pcur :	40.2 [bar]	acur :	-10.00 [deg]	<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>1</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>48.3 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>74.2 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>3.75 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>25.0 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1285 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>5.9 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>6 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>5.0 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>38.6 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	1	ptdc :	48.3 [bar]	pmax :	74.2 [bar]	apmax :	3.75 [deg]	pexp :	25.0 [bar]	rpm :	1285 [1/min]	mip :	5.9 [bar]	pind :	6 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	5.0 [deg]	pcur :	38.6 [bar]	acur :	-10.00 [deg]
Cyl :	2																																																														
ptdc :	45.0 [bar]																																																														
pmax :	62.0 [bar]																																																														
apmax :	7.75 [deg]																																																														
pexp :	20.5 [bar]																																																														
rpm :	1215 [1/min]																																																														
mip :	3.8 [bar]																																																														
pind :	4 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	4.3 [deg]																																																														
pcur :	40.2 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Cyl :	1																																																														
ptdc :	48.3 [bar]																																																														
pmax :	74.2 [bar]																																																														
apmax :	3.75 [deg]																																																														
pexp :	25.0 [bar]																																																														
rpm :	1285 [1/min]																																																														
mip :	5.9 [bar]																																																														
pind :	6 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	5.0 [deg]																																																														
pcur :	38.6 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Paliwo RMD 80																																																															
<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>1</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>71.4 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>72.1 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>3.00 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>20.6 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1264 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>3.5 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>4 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>3.3 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>42.1 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	1	ptdc :	71.4 [bar]	pmax :	72.1 [bar]	apmax :	3.00 [deg]	pexp :	20.6 [bar]	rpm :	1264 [1/min]	mip :	3.5 [bar]	pind :	4 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	3.3 [deg]	pcur :	42.1 [bar]	acur :	-10.00 [deg]	<table border="1"> <tr><td>Cyl :</td><td>2</td></tr> <tr><td>ptdc :</td><td>75.1 [bar]</td></tr> <tr><td>pmax :</td><td>76.1 [bar]</td></tr> <tr><td>apmax :</td><td>0.75 [deg]</td></tr> <tr><td>pexp :</td><td>24.3 [bar]</td></tr> <tr><td>rpm :</td><td>1186 [1/min]</td></tr> <tr><td>mip :</td><td>6.7 [bar]</td></tr> <tr><td>pind :</td><td>6 [kW]</td></tr> <tr><td>texh :</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>pscav :</td><td>1.00 [bar]</td></tr> <tr><td>frack :</td><td></td></tr> <tr><td>vit :</td><td></td></tr> <tr><td>shift :</td><td>4.3 [deg]</td></tr> <tr><td>pcur :</td><td>40.7 [bar]</td></tr> <tr><td>acur :</td><td>-10.00 [deg]</td></tr> </table>		Cyl :	2	ptdc :	75.1 [bar]	pmax :	76.1 [bar]	apmax :	0.75 [deg]	pexp :	24.3 [bar]	rpm :	1186 [1/min]	mip :	6.7 [bar]	pind :	6 [kW]	texh :	[°C]	pscav :	1.00 [bar]	frack :		vit :		shift :	4.3 [deg]	pcur :	40.7 [bar]	acur :	-10.00 [deg]
Cyl :	1																																																														
ptdc :	71.4 [bar]																																																														
pmax :	72.1 [bar]																																																														
apmax :	3.00 [deg]																																																														
pexp :	20.6 [bar]																																																														
rpm :	1264 [1/min]																																																														
mip :	3.5 [bar]																																																														
pind :	4 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	3.3 [deg]																																																														
pcur :	42.1 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Cyl :	2																																																														
ptdc :	75.1 [bar]																																																														
pmax :	76.1 [bar]																																																														
apmax :	0.75 [deg]																																																														
pexp :	24.3 [bar]																																																														
rpm :	1186 [1/min]																																																														
mip :	6.7 [bar]																																																														
pind :	6 [kW]																																																														
texh :	[°C]																																																														
pscav :	1.00 [bar]																																																														
frack :																																																															
vit :																																																															
shift :	4.3 [deg]																																																														
pcur :	40.7 [bar]																																																														
acur :	-10.00 [deg]																																																														
Paliwo RMG 380																																																															

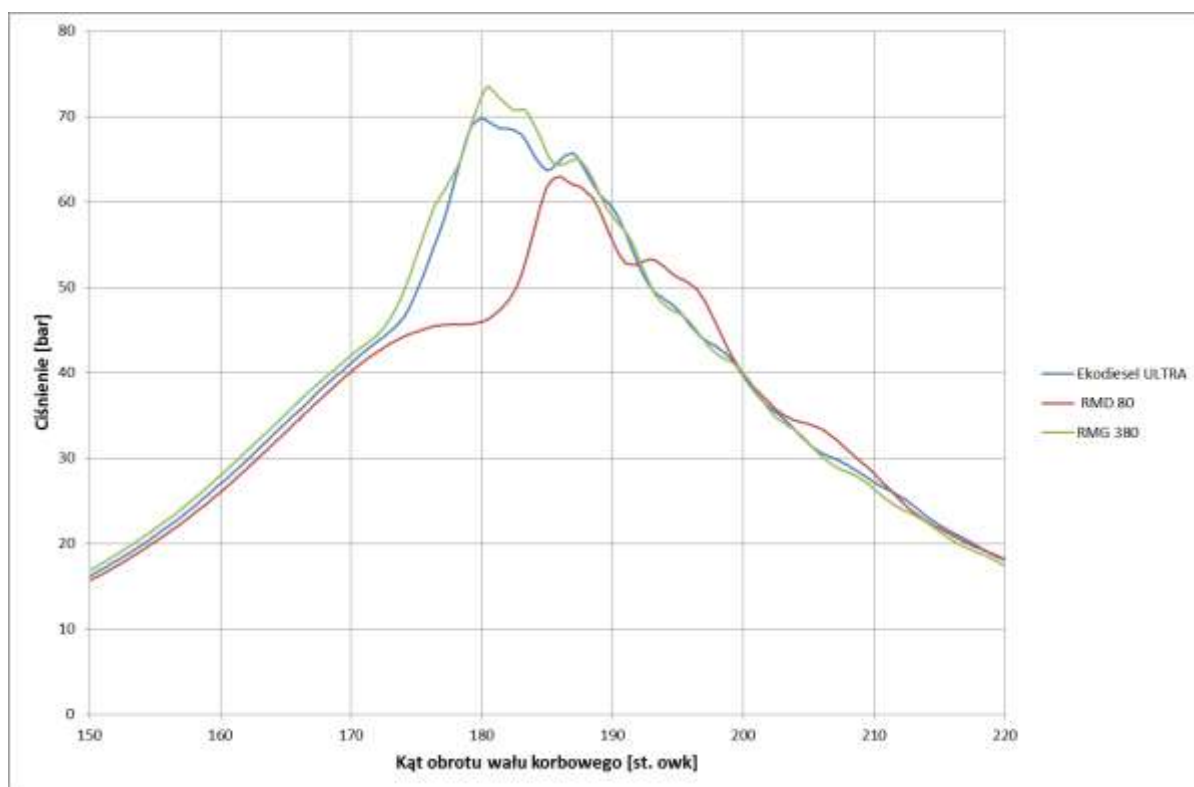
Rys. 11 Podstawowe wskaźniki pracy silnika uzyskane na podstawie indykowania cylindra



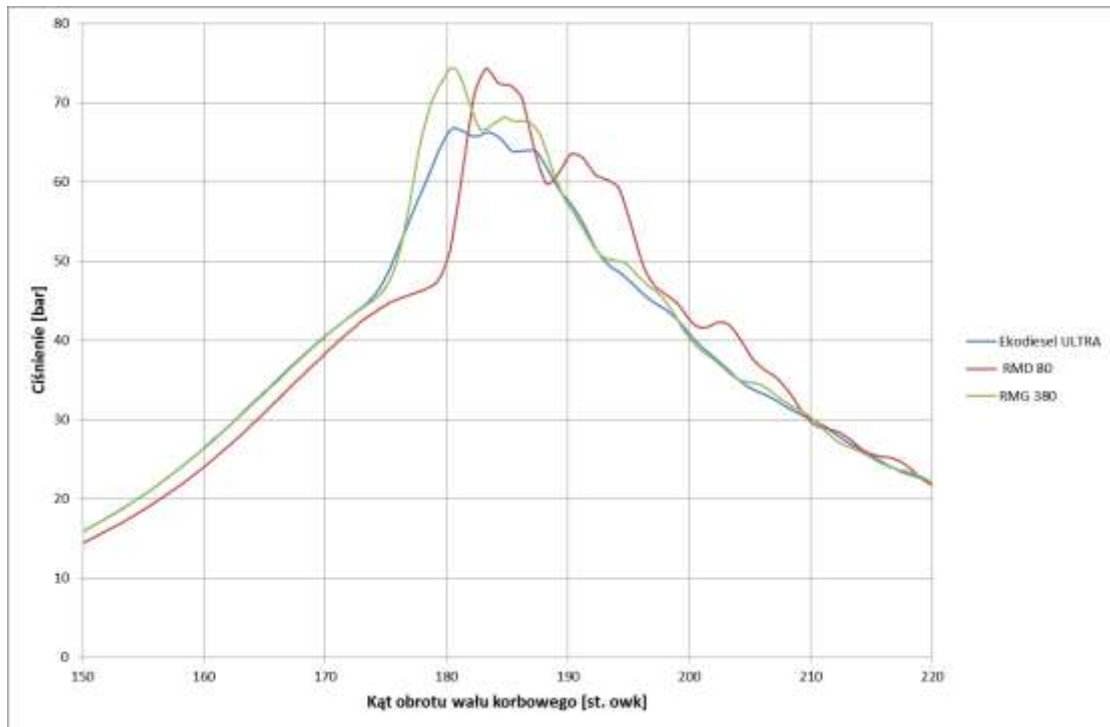
### 4.3. Analiza porównawcza wyników badań eksperymentalnych

W ramach analizy porównawczej uzyskanych podczas badań eksperymentalnych wyników zestawiono i poddano analizie rezultaty w następujących kategoriach:

- a) Zmiany ciśnienia podczas procesu spalania ze szczególnym uwzględnieniem zwłoki zapłonu, kąta występowania  $p_{max}$  oraz wartości ciśnienia rozprężania  $p_{exh}$  ( $36^\circ$  owk za GMP) - jak można zauważyć (rys. 12 - 13) przebiegi ciśnień podczas procesu spalania różnią się dosyć istotnie przede wszystkim, wzięwszy pod uwagę okres zwłoki zapłonu. Szczególnie wyraźna jest znacząco większa wartość tego wskaźnika dla paliwa RMD 80. Późniejszy samozapłon paliwa skutkuje w tym przypadku mniejszą wartością ciśnienia maksymalnego dla obciążeń częściowych oraz większą wartością kąta wystąpienia  $p_{max}$ . Zjawisko to ulega istotnej poprawie po zwiększeniu obciążenia silnika. Można ogólnie stwierdzić, że zwiększenie obciążenia w pewien sposób zaciera różnice w przebiegu ciśnień podczas procesu spalania – zbliżone wartości  $p_{max}$ ,  $\alpha_{pmax}$  i  $p_{exh}$  nie likwidując jednak niekorzystnego zjawiska wydłużenia zwłoki zapłonu.

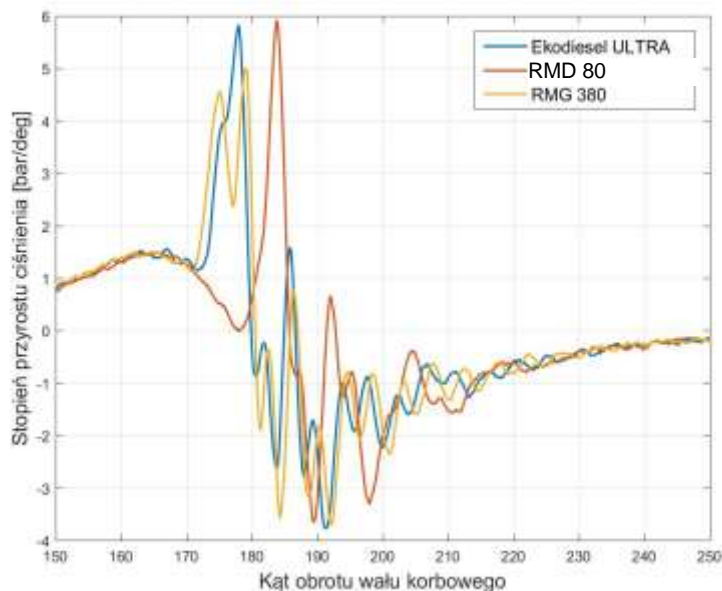


Rys. 12 Zmiany ciśnienia wewnątrz cylindrowego podczas pracy silnika na trzech rodzajach paliwa – warunki Load1

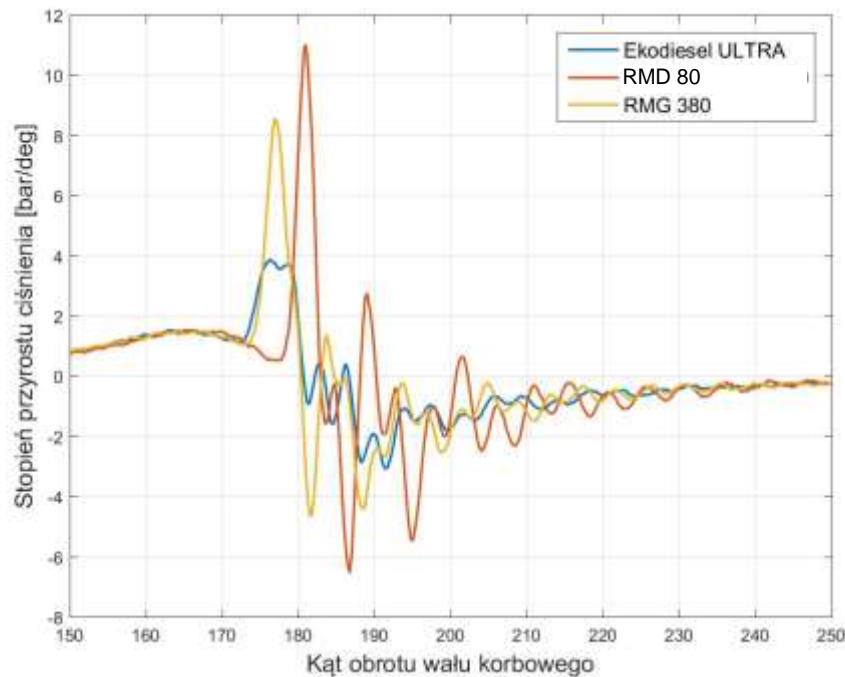


Rys. 13 Zmiany ciśnienia wewnątrzcyldrowego podczas pracy silnika na trzech rodzajach paliwa – warunki Load2

- b) Stopień przyrostu ciśnienia w czasie spalania  $dp/d\alpha$  - Wyniki przedstawione na rys. 14 - 15 w pełni potwierdzają spostrzeżenia punktu „a”. Stopień przyrostu ciśnienia  $dp/d\alpha$  w czasie spalania jest w przypadku zasilania silnika paliwem pozostałościowym porównywalny dla małych wartości obciążenia. Zwiększenie obciążenia silnika prowadzi do znaczącego wzrostu tego wskaźnika, który odpowiednio wzrasta w tej sytuacji ponad dwukrotnie.



Rys. 14 Stopień przyrostu ciśnienia w czasie spalania podczas pracy silnika na trzech rodzajach paliwa – warunki Load1



Rys. 15 Stopień przyrostu ciśnienia w czasie spalania podczas pracy silnika na trzech rodzajach paliwa – warunki Load2

- c) Rozrzut maksymalnych ciśnień spalania w czasie 10 losowo wybranych suwów rozprężania - Rozrzut maksymalnych ciśnień spalania w czasie 10 losowo wybranych suwów rozprężania nie wykazuje w rozpatrywanych przypadkach żadnej wyraźnej tendencji ani prawidłowości. Dla wszystkich rodzajów paliwa oscyluje wokół 10% a ewentualne stwierdzenie istniejących w tym zakresie reguł (lub stwierdzenie ich braku) wymaga najprawdopodobniej dłuższego okresu badań w warunkach dużo większej liczby wariantów obciążenia
- d) Wartości RMS prędkości drgań - Wartości RMS prędkości drgań (tab. 8) świadczą, że we wszystkich wariantach pracy silnika nie przekraczają one wartości dopuszczalnych (wg normy ISO 10816 dla maszyn tłokowych wartość ta wynosi w najbardziej restrykcyjnym wariantcie 44,6 mm/s). Widmo prędkości drgań (rys. 6, 8 i 10) we wszystkich przypadkach wskazuje na dominującą I harmoniczną silnika 1 – cylindrowego pracującego z  $n \approx 1200$  obr/min tzn. ok. 20 Hz (konkretnie ze względu na tzw. „przeciekanie” wartości maksymalne pojawiają się wokół  $v_{RMS} = 18,5$  mm/s)

Tab. 8 Zestawienie wyników pomiaru RMS prędkości i przyspieszenia drgań

	Filter	Units	Peak	P-P	Max	RMS
Ekodiesel ULTRA	VeIMF	m/s	0,056234	0,110917	0,023988	0,022646
	HP1	m/s <sup>2</sup>	298,5383	568,8529	39,81072	35,07519

RMD 80	VelMF	m/s	0,089125	0,156675	0,033497	0,031261
	HP1	m/s <sup>2</sup>	518,8	988,5531	53,08844	42,65795
RMG 380	VelMF	m/s	0,08414	0,141254	0,028184	0,026303
	HP1	m/s <sup>2</sup>	484,1724	954,9926	45,18559	38,01894

e) Wskaźniki efektywności

Wyniki pomiarów zużycia paliwa i ich konsekwencje w postaci wartości wskaźników efektywności – jednostkowe zużycie paliwa przez silnik (zespół prądotwórczy) oraz sprawność zestawione zostały w tab. 9.

Tab. 9 Zestawienie wyników pomiaru zużycia paliwa i wskaźników pochodnych

Moc na zaciskach prądnicy	Wartość opałowa dolna paliwa	Zużyta masa paliwa	Godzinowe zużycie paliwa	Jednostkowe zużycie paliwa	Skorygowane jednostkowe zużycie paliwa <sup>1</sup>	Sprawność ogólna silnika (zespołu)
[W]	[MJ/kg]	[kg]	[kg/h]	[kg/kWh]	[kg/kWh]	[-]
2125	<b>Ekodiesel ULTRA</b>					
	42,44	0,4428	0,8856	0,417	0,414	0,204
	<b>RMD 80</b>					
	41,97	0,471	0,943	0,443	0,436	0,193
	<b>RMG 380</b>					
	43,24	0,495	0,991	0,467	0,472	0,179

Analiza uzyskanych wyników jednoznacznie wskazuje, że silnik zasilany paliwami pozostałościowymi osiąga niższe (gorsze) wartości wskaźników efektywności zamiany energii chemicznej paliwa na energię mechaniczną (przy założeniu, że sprawność prądnicy i przekładni pasowej przeniesienia napędu nie ulega zmianie). Należy jednak zauważyć również, że objętościowy pomiar zużycia paliwa, któremu towarzyszą zmiany temperatury (dość znaczne w przypadku paliw ciężkich) w stosunkowo krótkim czasie (ok. 30 minut) wprowadzać może istotny błąd ostatecznego wyniku. Dlatego wydaje się, że zalecana byłaby modyfikacja stanowiska umożliwiająca pomiar masy zużytego paliwa.

## 5. Uwagi i wnioski końcowe

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań pilotażowych można ogólnie stwierdzić, że zbudowane stanowisko laboratoryjne do badania efektywności energetycznej nowo produkowanych paliw żeglugowych oraz oceny ich oddziaływania na emisyjność spalin silnikowych i zanieczyszczenie atmosfery toksycznymi i szkodliwymi związkami chemicznymi, jak również skutków zastosowania tych paliw na intensywność degradacji elementów konstrukcyjnych silnika spełnia zakładane wymagania techniczne.

Po dokonaniu drobnych modyfikacji (np. zastąpienie wody w zbiorniku podgrzewania paliwa olejem grzewczym) możliwe będzie przejście do kolejnego etapu realizacji projektu, a mianowicie przeprowadzenia zasadniczego programu badań eksperymentalnych i na tej podstawie - opracowania metodyki testowania nowego rodzaju paliw żeglugowych w rzeczywistych warunkach pracy silnika okrętowego.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Korczewski Z., Rudnicki J., Zadrąg 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.
- [5] Emission Standards, International: IMO Marine Engine Regulations.
- [6] ISO 8178-10:2013. Reciprocating internal combustion engines. Exhaust emission measurement. Part 10: Test cycles and test procedures for field measurement of exhaust gas smoke emissions from compression ignition engines operating under transient conditions.
- [7] Norma ISO – 10816 „Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts”.