

## INFLUENCE OF DIESEL ENGINE FUELLING WITH MINERAL AND VEGETABLE FUELS ON THE ANGLE OF INJECTION ADVANCE AND CHARACTERISTICS OF HEAT EMISSION

Andrzej Ambrozik<sup>1</sup>, Stanisław Kruczyński<sup>2</sup>, Janusz Jakóbiec<sup>3</sup>  
Stanisław Orliński<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Politechnika Świętokrzyska, Wydział ZiMK, Instytut Modelowania Procesów, Kielce  
Al. Tysiąclecia PP 7, e-mail: silspal@tu.kielce.pl

<sup>2</sup>Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, Instytut Pojazdów, Warszawa ul. Narbutta 84  
e-mail: skruczyn@simr.pw.edu.pl

<sup>3</sup>Instytut Technologii Nafty, Kraków, Kraków ul. Łukasiewicza 1, e-mail: j.jakobiec@itn.com.pl

<sup>4</sup>Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Radom  
ul. Chrobrego 45, tel.+48 48 3617661, e-mail: walorl@wp.pl.

### Abstract

The paper presents investigation results of the engine AD3.152 fuelled with hydrocarbon fuel EKODIESEL PLUS 50B and vegetable fuel EKODIESEL PLUS 50B that allow to determine the angle of injection advance and characteristics of heat emission during the combustion process. Analysis of the obtained diagrams of fuel pressure in the injection pipe enables to determine fuel pressure increase rate. The combustion process is a compound, periodically repeated high-frequency process going inside a cylinder of the piston-combustion engine. One from enough easily obtained and authoritative sources of information on the course processes reaching inside the cylinder is the indicatory diagram. Economical, energy-related and ecological indicators work of the engine with immediate way are relative to the course of the indicatory diagram, and this in turn is relative to the process of the combustion estimated by means of the characteristics of heat release. As result of research constated that was useful conduct of further research processes of the fuel injection and courses of the relative quantity of heat release during the process of the combustion, at the power supply of the engine both fuels mineral origin as and vegetable.

**Keywords:** transport, combustion engines, fuel feed, alternative fuels, injection advance

## WPLYW ZASILANIA SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM PALIWEM MINERALNYM I ROŚLINNYM NA KĄT WYPRZEDZENIA WTRYSKU I CHARAKTERYSTYKI WYDZIELANIA CIEPŁA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań silnika AD3.152 zasilanego paliwem mineralnym (węglowodorowym) EKODIESEL PLUS 50B oraz roślinnym BIODIESEL D-FAME pozwalające wyznaczyć kąt wyprzedzenia wtrysku oraz charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spalania. Analiza eksperymentalnie wyznaczonych wykresów przebiegu ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wzniosu iglicy wtryskiwacza umożliwia wyznaczenie kąta wyprzedzenia wtrysku. Wyznaczanie charakterystyk względnej prędkości wydzielania się ciepła podczas procesu spalania przeprowadzono w oparciu o eksperymentalnie sporządzone wykresy indykatorowe silnika. Proces spalania jest złożonym, okresowo powtarzającym się szybkozmiennym procesem zachodzącym wewnątrz cylindra tłokowego silnika spalinowego. Jednym z dość łatwo uzyskiwanych i wiarygodnych źródeł informacji o przebiegu procesów zachodzących wewnątrz cylindra jest wykres indykatorowy. Ekonomiczne, energetyczne i ekologiczne wskaźniki pracy silnika w bezpośredni sposób zależą od przebiegu wykresu indykatorowego, a ten z kolei zależy od procesu spalania ocenianego za pomocą charakterystyk wydzielania ciepła. W wyniku badań stwierdzono, że celowym jest prowadzenie dalszych badań procesów wtrysku paliwa i przebiegów względnej ilości wydzielającego się ciepła podczas procesu spalania, przy zasilaniu silnika zarówno paliwami pochodzenia mineralnego jak i roślinnego.

**Słowa kluczowe:** transport, silniki spalinowe, zasilanie, paliwa alternatywne, wyprzedzenie wtrysku

## 1. Wstęp

Proces spalania jest złożonym, okresowo powtarzającym się szybkozmiennym procesem zachodzącym wewnątrz cylindra tłokowego silnika spalinowego. Jednym z dość łatwo uzyskiwanych i wiarygodnych źródeł informacji o przebiegu procesów zachodzących wewnątrz cylindra jest wykres indykatorowy. Ekonomiczne, energetyczne i ekologiczne wskaźniki pracy silnika w bezpośredni sposób zależą od przebiegu wykresu indykatorowego, a ten z kolei zależy od procesu spalania ocenianego za pomocą charakterystyk wydzielania ciepła.

Pod pojęciem charakterystyk wydzielania ciepła rozumiemy względną ilość i prędkość względnej ilości ciepła wydzielającego się podczas procesu spalania z uwzględnieniem ciepła traconego do ścianek komory spalania [1]. Ocena jakości pracy silnika zasilanego paliwami o różnych właściwościach fizykochemicznych wymaga zastosowania dokładnych pomiarów wielkości opisujących rzeczywisty przebieg procesów roboczych w cylindrze.

## 2. Cel badań

Celem badań jest ocena wpływu zasilania silnika AD3.152 pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej dwoma rodzajami paliw ekologicznych, to jest węglowodorowym, niskosiarkowym olejem napędowym EKODIESEL PLUS 50B, oraz estrami metylowymi kwasów oleju rzepakowego BIODIESEL D-FAME na:

- o wartości kąta wyprzedzenia wtrysku  $\alpha_{ww}$  ze 100 cykli pracy silnika,
- o względnej ilości prędkości wydzielającego się ciepła  $\dot{x}$  podczas spalania, ze 100 cykli pracy silnika.

## 3. Stanowisko badawcze oraz właściwości fizykochemiczne paliw

Badania przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w silnik o zapłonie samoczynnym AD3.152 z bezpośrednim wtryskiem paliwa, wyposażonym w aparaturę wtryskową typu DPA 3328 F-510 [2]. Stanowisko wyposażone było w system pomiarowy umożliwiający pomiar wielkości szybkozmiennych. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rys.1. Wybrane właściwości fizykochemiczne badanych paliw: węglowodorowego EKODIESEL PLUS 50B i roślinnego BIODIESEL D-FAME przedstawiono w tabeli 1.

## 4. Opis metody badań

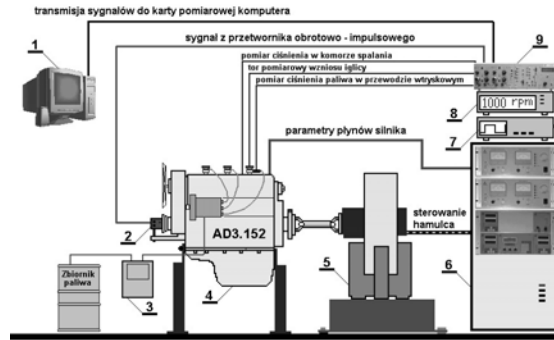
Na rys.2. pokazano przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza oraz rozwinięty wykres indykatorowy ciśnienia w cylindrze z zaznaczeniem kątów wyprzedzenia wtrysku i kąta opóźnienia samozapłonu.

Ilustrację graficzną metody wyznaczania okresu opóźnienia samozapłonu przedstawiono na rys.3. Przecięcie charakterystyki  $T(\alpha)$  wyznaczonej dla procesu sprężania, przy założeniu, że czynnikiem roboczym jest powietrze, z krzywą  $T(\alpha)$  wyznaczoną dla  $\alpha \leq \alpha_{GMP}$  przy założeniu, że czynnikiem roboczym są produkty zupełnego i całkowitego spalania paliwa jest punktem rozpoczęcia procesu spalania. Krzywą  $T(\alpha)$  dla procesu sprężania sporządzano dla  $\alpha \geq \alpha_{ww}$ , zaś krzywą  $T(\alpha)$  dla procesu spalania sporządzano dla  $\alpha \leq \alpha_{GMP}$ .

W każdym, co 200 obr/min punkcie pomiarowym należącym do zewnętrznej charakterystyki prędkościowej silnika, rejestrowano 100 kolejnych przebiegów ciśnienia w cylindrze i przewodzie wtryskowym oraz wzniosu iglicy wtryskiwacza, przy stałym ustawieniu nominalnego kąta dynamicznego początku tłoczenia paliwa, równego  $\alpha_{dpt}=17$  °OWK.

Na podstawie zmierzonych wielkości wyznaczano:

- kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa,
- przebieg ciśnienia w cylindrze.

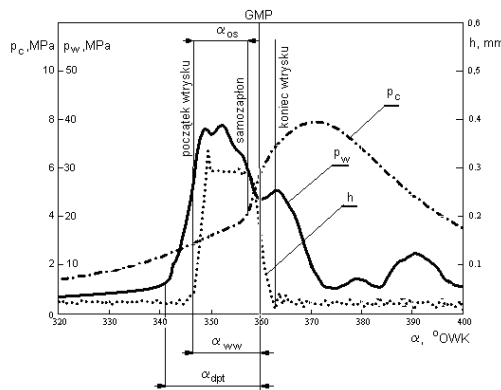


Rys.1. Schemat stanowiska badawczego [2]: 1 – komputer z wbudowaną kartą pomiarową KPCI 3110 firmy Keithley, 2 – przetwornik obrotowo – impulsowy firmy Intron, 3 – przepływomierz paliwa, 4 – silnik AD3.152, 5 – hamulec, 6 – szafa sterowania hamulcem i kontroli parametrów pracy silnika, 7 – generator podstawy czasu, 8 – moduł pomiaru prędkości obrotowej wału korbowego, 9 – wzmacniacz sygnału

Fig.1. Diagram of the test stand [2]: 1 – computer with Keithley KPCI 3110 measurement card, 2 – encoder of crankshaft angle, 3 – fuel flow meter, 4 – tested engine AD3.152, 5 – engine brake, 6 – steering module of engine brake, 7 – time base generator, 8 – engine crankshaft speed control module, 9 – amplifier of piezosensor signal

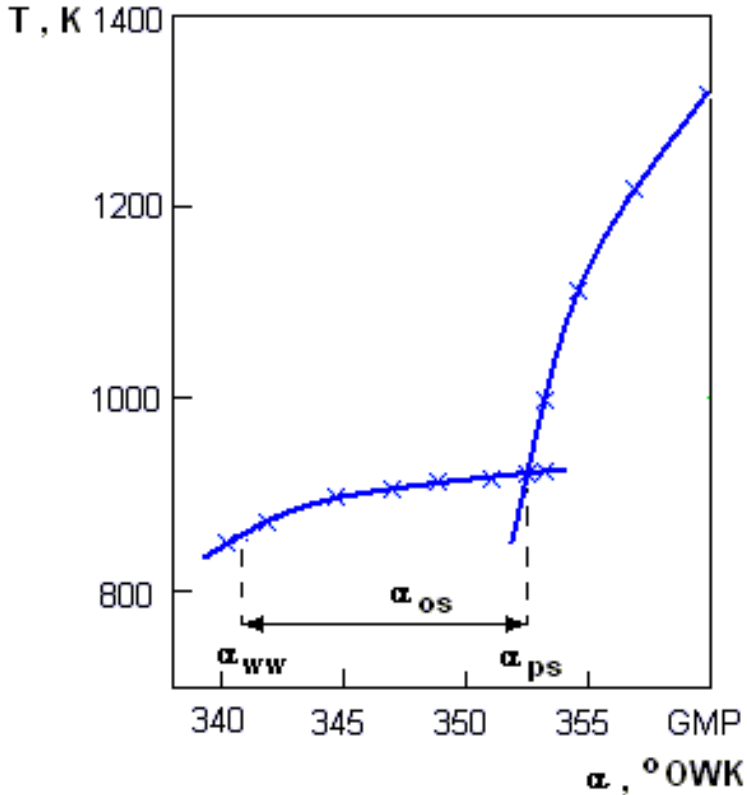
Tabela 1. Wybrane własności fizykochemiczne paliw zastosowanych w badaniach [4, 5]  
Table 1. Selected physicochemical characteristics of examined fuels [4, 5]

PARAMETR	EKODIESEL PLUS 50 B	BIODIESEL D-FAME
Liczba cetonowa	51,5	51,3
Gęstość w 20°C [10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ]	0,836	0,882
Lepkość kinematyczna w 40°C [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s]	2,75	4,52
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,4	38,9
Własności fizykochemiczne dla paliwa naturalnego określono wg PN-EN 590, zaś paliwa FAME wg. PN-EN 590:2005		



Rys.2. Przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza ( $h$ ), ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym ( $p_w$ ) oraz otwarty wykres indykatorowy ( $p_c$ ) z zaznaczeniem kątów [2]:  $\alpha_{dpt}$  – kąt dynamicznego początku tłoczenia,  $\alpha_{ww}$  – kąt wyprzedzenia wtrysku,  $\alpha_{os}$  – kąt opóźnienia samozapłonu,

Fig.2. Course of injector needle lift ( $h$ ), fuel pressure in the injection pipe ( $p_w$ ) and opened indicator diagram ( $p_c$ ) with marked angles [2] :  $\alpha_{dpt}$  – dynamic pumping beginning angle,  $\alpha_{ww}$  – injection advance angle,  $\alpha_{os}$  – self ignition delay angle



Rys.3. Ilustracja graficzna metody wyznaczania kąta opóźnienia samozapłonu [2]:  $\alpha_{ww}$  – kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa,  $\alpha_{ps}$  – kąt początku spalania  
 Fig.3. Graphic illustration of self-ignition delay period calibration method [2]:  $\alpha_{ww}$  – beginning of fuel injection,  $\alpha_{ps}$  – beginning of combustion process

znaczenie względnej ilości wydzielonego ciepła w czasie procesu spalania przeprowadzono w oparciu o równanie I zasady termodynamiki i równanie stanu w postaci [1]:

$$\begin{cases} dQ_x = dU + p dV + dQ_{sc} + dQ_{dys} \\ pV = \overline{M}RT \end{cases} \quad (1)$$

Dzieląc tę zależność przez całkowitą ilość wydzielonego ciepła z całkowitego i zupełnego spalania dawki paliwa o wartości opałowej  $W_u$  otrzymujemy:

$$dx = dx_i + dx_{sc} + dx_{dys} \quad (2)$$

lub w postaci całkowitej:

$$x = x_i + x_{sc} + x_{dys} \quad (3)$$

Ilość ciepła wydzielonego ze spalania dawki paliwa obliczamy ze wzoru:

$$dQ_x = \xi \cdot g_{obieg} \cdot W_u dx; \quad Q_x = \xi \cdot g_{obieg} \cdot W_u \cdot x \quad (4)$$

gdzie:

$\xi$  – efektywny współczynnik wydzielania ciepła podczas procesu spalania.  
Ciepło przekazane do ścianek komory spalania obliczano ze wzoru:

$$dQ_{sc} = \alpha_{sc} \cdot F \cdot dt. \quad (5)$$

Wielkość  $\alpha_{sc}$  wyznaczano według znanych zależności empirycznych podawanych w literaturze specjalistycznej. Wielkość  $F$  jest powierzchnią wymieniającą ciepło, zaś wartość  $dt$  można zastąpić wielkością skończoną  $\Delta t = \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{6 \cdot n}$ , w której  $\alpha$  jest kątem obrotu wału korbowego. W prezentowanej, w artykule metodyce założono, że zjawisko dysocjacji podczas procesu spalania jest nieznaczne i przyjęto, że  $Q_{dys} = 0$ . Po przekształceniach i zastąpieniu różniczek różnicami skończonymi oraz wykorzystaniu zaproponowanej przez Woschniego zależności do obliczania współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha_{sc}$ , otrzymano wzór na obliczanie względnej ilości ciepła wydzielającego się podczas spalania, w postaci:

$$x = \frac{1}{\xi \cdot g_{obieg} \cdot W_u} \left\{ \frac{1}{k-1} \left[ k \frac{p_i + p_{i-1}}{2} (V_i - V_{i-1}) + \frac{V_i + V_{i-1}}{2} (p_i - p_{i-1}) \right] \right\} + \frac{\alpha_{sc} \cdot \left( F \cdot \frac{\alpha_i - \alpha_{i-1}}{6 \cdot n} \right) \cdot (T - T_{sc})}{\xi \cdot g_{obieg} \cdot W_u} \quad (6)$$

gdzie:

$$\alpha_{sc} = 110 \cdot D^{-0,2} \cdot \left( 2,28 \cdot \frac{S \cdot n}{30} \right)^{0,8} \cdot (p_{isr})^{0,8} \cdot (T_{sr})^{-0,53},$$

$T_{sr}$  – temperatura gazów w cylindrze,  
 $T_{sc}$  – temperatura ścianek cylindra,  
 $F$  – powierzchnia wymieniająca ciepło.

Wartość prędkości względnej ilości wydzielającego się ciepła wyznaczamy ze wzoru:

$$\dot{x} = \frac{X_i - X_{i-1}}{\alpha_i - \alpha_{i-1}}. \quad (7)$$

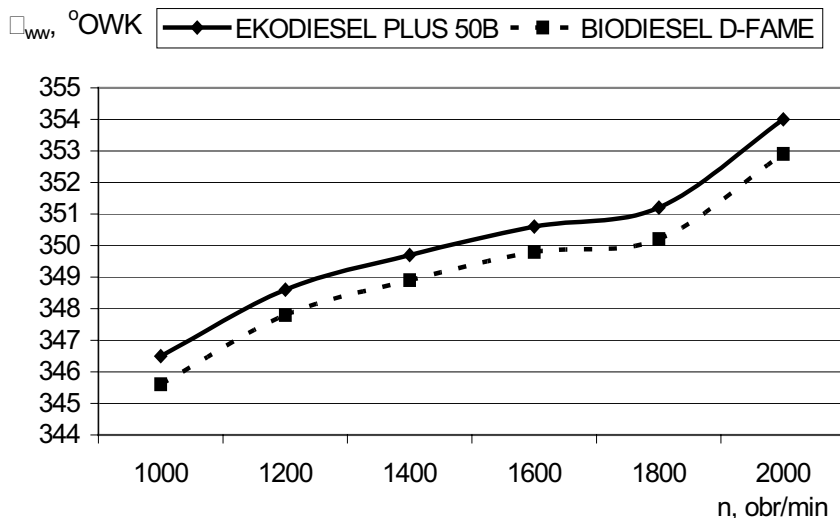
## 5. Wyniki pomiarów kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa

Na rysunku 4 w postaci graficznej przedstawiono porównanie kąta wyprzedzenia wtrysku dla paliw EKODIESEL PLUS 50B oraz BIODIESEL D-FAME, przy pracy silnika AD3.152 według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej w przedziale prędkości obrotowych wału korbowego od  $n = 1000$  do  $n = 2000$  obr/min, uśrednione ze 100 cykli wtrysków paliwa.

## 6. Wyniki badań procesu wydzielania ciepła

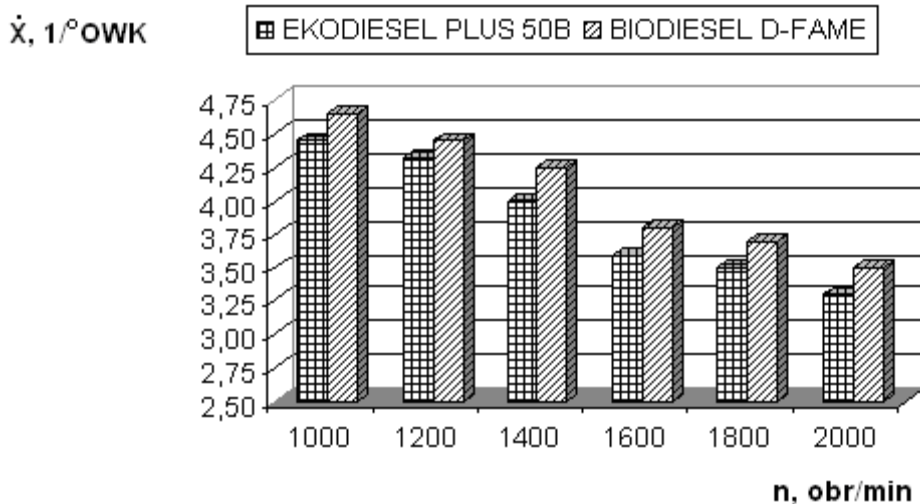
Rysunek 5 przedstawia uśrednione ze 100 cykli co 200 obr/min porównanie prędkości względnej ilości ciepła wydzielającego się podczas procesu spalania w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika AD3.152 pracującego wg. zewnętrznych charakterystyk prędkościowych w

przedziale prędkości obrotowej ( $n=1000 - 2000$  obr/min) i zasilanego paliwami: EKODIESEL PLUS 50B oraz BIODIESEL D-FAME.



Rys. 4. Porównanie uśrednionego dla 100-cykli wtrysków paliwa kąta wyprzedzenia wtrysku dla paliw: EKODIESEL PLUS 50B oraz BIODIESEL D-FAME, przy pracy silnika AD3.152 według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, w przedziale prędkości obrotowych wału korbowego silnika od  $n= 1000$  do  $2000$  obr/min

Fig. 4. Comparison of the fuel injection angle averaged for 100 injection cycles for EKODIESEL PLUS 50B and BIODIESEL D-FAME, for engine work according to external speed characteristic, at the speed from the range 1000-2000 rpm



Rys. 5. Porównanie prędkości względnej ilości wydzielającego się ciepła  $\dot{\alpha}$  podczas procesu spalania w funkcji obrotu wału korbowego silnika AD3.152 co 200 obr/min w przedziale  $n=1000-2000$  obr/min zasilanego badanymi paliwami

Fig. 5. Exemplary diagram of relative rate of heat emission  $\dot{\alpha}$  during combustion process versus crankshaft rotation angle of the AD3.152 engine fuelled with investigated fuels

## **7. Wnioski**

Na podstawie wyników badań otrzymanych przy zasilaniu silnika dwoma paliwami ekologicznymi tj. niskosiarkowym olejem napędowym EKODIESEL PLUS 50B oraz paliwem roślinnym - ester metylowy kwasów oleju rzepakowego BIODIESEL D-FAME, można sformułować następujące wnioski:

- wartości uśrednionych przebiegów kąta wyprzedzenia wtrysku okazały się większe w całym zakresie prędkości obrotowych silnika tj. od 1000-2000 obr/min przy zasilaniu go paliwem roślinnym BIODIESEL D-FAME w porównaniu z zasilaniem go paliwem węglowodorowym EKODIESEL PLUS 50B,
- maksymalna prędkość wydzielającego się ciepła osiąga większe wartości przy zasilaniu silnika paliwem BIODIESEL D-FAME w porównaniu z zasilaniem go paliwem EKODIESEL PLUS 50B w badanym zakresie warunków pracy silnika,
- celowym jest prowadzenie dalszych badań procesów wtrysku paliwa i przebiegów względnej ilości wydzielającego się ciepła podczas procesu spalania, przy zasilaniu silnika zarówno paliwami pochodzenia mineralnego jak i roślinnego.

## **Literatura**

- [1] Ambrozik, A., *Wybrane zagadnienia procesów cieplnych w tłokowych silnikach spalinowych*, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2004.
- [2] Dokumentacja Techniczna.: *Stanowisko pomiarowe parametrów pomiarowych szybkozmiennych ciśnień*, IEPiM Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [3] Khacyjan, A. S., Labieckas, G. S., *Vlianie charakteristik vpryska raspylivania topliva na proces tieplovydelenija i pokazateli dizela s nadduvom*, Dvigatelestrojenie Nr 6, 1982.
- [4] Polski Koncern Naftowy ORLEN S.A., *Świadectwa jakości paliw*, Płock 2006.
- [5] Rafineria Trzebinia, *Świadectwa jakości paliw FAME*, Trzebinia 2006.

