

## INFLUENCE OF DIESEL ENGINE FUELLING WITH MINERAL AND VEGETABLE FUELS ON THE INJECTION PROCESS AND FUEL STREAM DISINTEGRATION

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

1. Politechnika Świętokrzyska, Wydział MiBM, Katedra Pojazdów i Sprzętu Mechanicznego, Kielce Al. Tysiąclecia PP 7, silspal@tu.Kielce.pl
2. Politechnika Warszawska, Wydział SiMR, Instytut Pojazdów, Warszawa ul. Narbutta 84, skruczyn@simr.pw.edu.pl
3. Instytut Technologii Nafty, Kraków, Kraków ul. Łukasiewicza 1, j.jakobiec@itn.com.pl
4. Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, Radom ul. Chrobrego 45, tel. (048) 3617661, walorl@wp.pl

### Abstract

The paper presents investigation results of the engine AD3.152 fuelled with mineral oil EKODIESEL PLUS-50 and vegetable oil BIODIESEL D-FAME that allows determining injection rate and injected fuel stream disintegration. The tests were made basing on extremal speed characteristic of engine using engine test bench with measurement system of high-speed pressure parameters and lift of injector needle. The aim of the tests was to comparison influence of self-ignition feeding mineral fuel Ekodiesel Plus 50B with select vegetable fuel BIODIESEL D-FAME. Using fuels of different physicochemical properties to compression-ignition engines requires high accuracy of diagnostic parameters measurements in order to learn differences in processes of injection and combustion. Necessity of fulfilling more and more strong standards, concerning emission of toxic components of exhaust gases, forces users of diesel engines to posses quick and precision methods of their technical state assessment and particularly of a combustion process and of injection equipment technical state. Analysis of the obtained diagrams of fuel pressure in the injection pipe and injection needle lift allows determining fuel outlaw rate from the atomizer and fuel stream disintegration info drops. Experimentally obtained indicator diagrams of cylinder pressure were also applied.

**Keywords:** diesel engine, investigation, engine diagnostics, ecological fuels, and environment, combustion processes

## WPLYW ZASILANIA SILNIKA SPALINOWEGO O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM PALIWEM MINERALNYM I ROŚLINNYM NA PROCES WTRYSKU ORAZ ROZPAD STRUGI PALIWA

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań silnika AD3.152 zasilanego paliwem mineralnym Ekodiesel Plus 50B oraz roślinnym BIODIESEL D-FAME pozwalające wyznaczyć prędkości wtrysku oraz rozpad strugi paliwa wtryskiwanej do cylindra na krople. Badania wykonano na bazie zewnętrznej prędkościowej charakterystyki silnika z wykorzystaniem stanowiska hamownianego wyposażonego w system pomiarowy parametrów szybkozmiennych ciśnień oraz przemieszczeń wzniosu iglicy wtryskiwacza. Badania przeprowadzono w celu porównania wpływu zasilania

silnika paliwem mineralnym Ekodiesel Plus 50B oraz wybranym paliwem roślinnym BIODIESEL D-FAME. Zastosowanie paliw o różnych właściwościach fizykochemicznych do silników wysokoprężnych wymaga dużych dokładności pomiarów parametrów diagnostycznych celem poznania występujących różnic w procesach wtrysku i spalania silników zasilanych tymi paliwami. Spełnianie coraz bardziej rygorystycznych norm w emisji składników toksycznych spalin zmusza współczesnego użytkownika silników spalinowych o zapłonie samoczynnym do posiadania szybkich i precyzyjnych metod oceny jego stanu technicznego, a szczególnie procesu spalania oraz stanu technicznego aparatury wtryskowej. Analiza eksperymentalnie sporządzonych wykresów ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wzniosów iglicy wtryskiwacza umożliwia wyznaczenie: prędkości wypływu paliwa z rozpylacza oraz rozpad strugi paliwa na krople, wykorzystując do tego również eksperymentalne wykresy indykatorowe ciśnień w cylindrze silnika.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, badania hamowniane, diagnostyka silnika, paliwa ekologiczne, środowisko, procesy spalania

## 1. Wstęp

Wzrastające ceny oleju napędowego spowodowały decyzje Rafinerii Trzebina o wznowieniu produkcji estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, zgodnie z wymaganiami jakościowymi dla paliwa (EMKOR) FAME (Fatty Acid Methyl Ester) określonymi normą PN-EN 14214.

Proces wtrysku paliwa jest złożonym, okresowo powtarzającym się szybkozmiennym procesem zachodzącym w aparaturze wtryskowej. Jednym z dość łatwo uzyskiwanych i wiarygodnych źródeł informacji o przebiegu procesu wtrysku są wykresy ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wzniosu iglicy wtryskiwacza.

Ekonomiczne, energetyczne i ekologiczne wskaźniki pracy silnika w bezpośredni sposób zależą od wykresu indykatorowego ciśnienia w cylindrze i przebiegu zmiany w/w wielkości w układzie zasilania silnika paliwem.

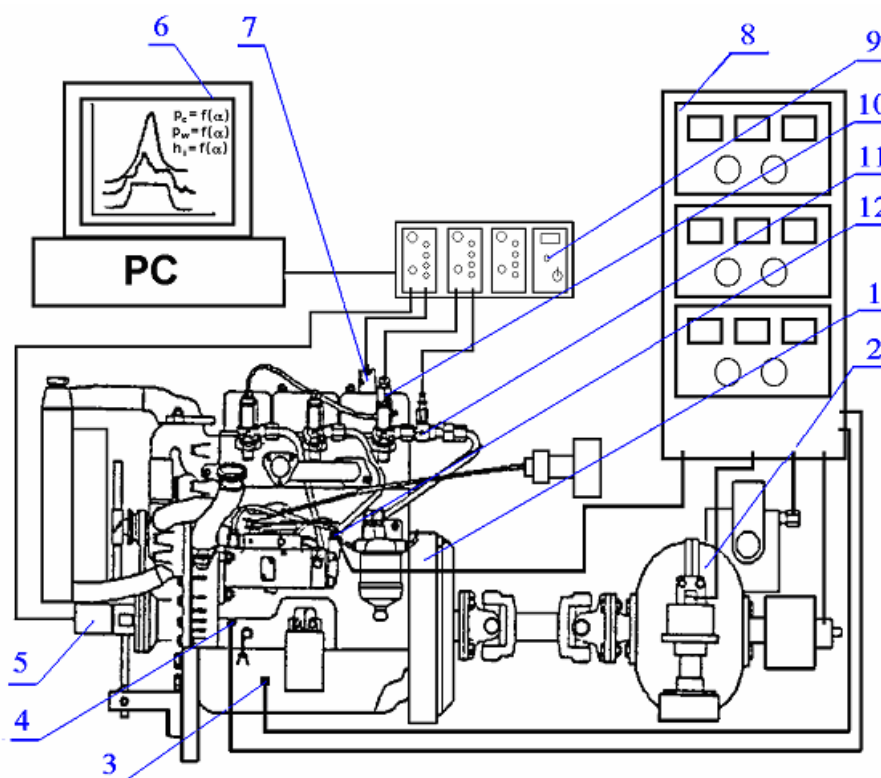
## 2. Cel badań

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

- wartości uśrednionych ze 100 cykli pracy silnika ciśnień paliwa w przewodzie wtryskowym,
- wartości prędkości wtrysku paliwa wyznaczone w oparciu o w/w uśrednione wykresy,
- prędkości i czas rozpadu strugi na krople oraz kąty i czasy penetracji tej strugi paliwa w cylindrze.

## 3. Stanowisko badawcze oraz wielkości fizykochemiczne paliw

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



Rys.1. Schemat stanowiska badawczego [2]:

1 – silnik AD3.152, 2 – hamulec wodny HS 75, 3 – czujnik temperatury oleju, 4 – czujnik temperatury czynnika chłodzącego silnik, 5 – nadajnik kąta obrotu wału korbowego firmy INTROL Poznań, 6 - komputer PC z kartą pomiarową, 7 – czujnik ciśnienia w komorze spalania, 8 - szafa sterowania i kontroli, 9 – zestaw wzmacniaczy sygnałów, 10 – czujnik wzniosu iglicy wtryskiwacza, 11 – czujnik ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym, 12 – czujnik temperatury paliwa

Fig.1. Test stand scheme [6]:

1- engine AD3.152, 2- water brake HS75, 3- detector of oil temperature, 4- detector of temperature of engine liquid coolant, 5- transducer of crankshaft rotation angle, 6- computer, 7- pressure detector in combustion chamber, 8- control cubicle, 9- signal amplifiers set, 10- detector of injector needle lift, 11- detector of fuel pressure in injection pipe, 12- detector of fuel temperature

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

PARAMETR	EKODIESEL PLUS 50 B	BIODIESEL D-FAME
Liczba cetanowa	51,5	51,3
Gęstość w 20°C [ $10^3 \text{ kg/m}^3$ ]	0,836	0,882
Lepkość kinematyczna w 40°C [ $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	2,75	4,52
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,4	38,9
Napięcie powierzchniowe $\sigma \cdot 10^{-2}$ , N/m	3,47	3,55
Własności fizykochemiczne dla paliwa naturalnego określono wg PN-EN 590, zaś paliwa FAME wg. PN-EN 590:2005		

#### 4. Opis metody badań

W punkcie pomiarowym, odpowiadającemu prędkości obrotowej maksymalnego momentu obrotowego  $n_{M_0} = 1400 \text{ obr/min}$  zewnętrznej charakterystyki prędkościowej silnika, zarejestrowano 100 kolejnych przebiegów ciśnienia w cylindrze, ciśnienia paliwa w przewodzie

wtryskowym oraz wzniosów iglicy wtryskiwacza, przy stałym ustawieniu nominalnego kąta dynamicznego początku tłoczenia paliwa, równego  $\alpha_{dpt}=15^\circ$  OWK.

Na podstawie zmierzonych wielkości wyznaczono uśrednione wartości:

- ciśnienia w cylindrze,
- ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym,
- wznios iglicy wtryskiwacza.

Po wstępnym przygotowaniu wykresu indykatorowego do dalszej jego analizy obliczano:

- wartość dawki paliwa ( $m_p$ ) spalonego w czasie 1-go cyklu pracy silnika, według zależności [3]:

$$m_p = \frac{G_e}{30 \cdot n \cdot c} \text{ [kg/cykl]}, \quad (1)$$

gdzie:

- $G_e$  – godzinowe zużycie paliwa, kg/h,
- $n$  – prędkość obrotowa wału korbowego, obr/min,
- $c$  – ilość cylindrów.

Początkową prędkość wypływu strumienia paliwa z wtryskiwacza  $u_p$  (w przekroju wylotowym rozpylacza) obliczano z zależności:

$$u_p = \mu \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \text{ [m/s]}, \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta p$  - różnica ciśnienia cieczy przed otworkiem rozpylacza i ciśnienia ośrodka do którego ciecz jest wtryskiwana, Pa,

$\rho$  - gęstość cieczy, kg/m<sup>3</sup>,

$\mu$  - współczynnik wypływu zależy od konstrukcji rozpylacza.

Obliczenie liczby Webera [5]:

$$We = \frac{\rho_o u^2 d}{\sigma} \text{ [m/s]}, \quad (3)$$

gdzie:

$\rho_o$  - gęstość ośrodka gazowego, do którego następuje wtrysk paliwa, kg/m<sup>3</sup>,

$u$  - prędkość cieczy w ośrodku gazowym,

$d$  - średnica otworka rozpylacza WZM, DSL-150 A-38 silnika AD3.152, która jest równa  $d = 0,28$  mm,

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe, N/m.

Krople paliwa powstałe w wyniku pierwotnego rozpadu strugi paliwa ulegają dalszemu rozpadowi pod warunkiem, że nie uderzą o ściankę komory spalania. Zakładając krytyczną wartość liczby Webera, ( $We_{kr} = 10 \div 14$ ) można określić maksymalną prędkość kropli (o określonej średnicy), powyżej, której następuje jej rozpad:

$$u_{kr} = \sqrt{\frac{We_{kr}}{\rho_o d}} \text{ [m/s]}. \quad (4)$$

Wtórny rozpad kropeł następuje na skutek działania siły oporów aerodynamicznych ruchu kropeł w ośrodku, w którym panuje podwyższone ciśnienie gazu.

Obliczenia średnicy  $d_{kr}$  [1], dla badanych paliw i kilku względnych prędkości ( $u$ ) przeprowadzono według wzoru:

$$d_{kr} = \frac{\sigma We_{kr}}{\rho_g u^2}, \quad (5)$$

gdzie:

$\sigma$  - napięcie powierzchniowe, N/m,

$\rho$  - gęstość ośrodka (dla  $M_{omax}$  i  $n= 1400$  obr/min jest  $\rho = 10,5$  kg/m<sup>3</sup>),

$We_{kr}$  - krytyczna wartość liczby Webera,

$u$  - krytyczne prędkości kropeł.

Średnią średnicę kropeł obliczano ze wzoru empirycznego w zależności od parametrów wtrysku paliwa. Średnią średnicę Sautera ( $d_{32}$ ) tj. średnicę jednorodnego zbioru zastępczych kropeł o takiej samej sumarycznej objętości i takiej samej sumarycznej powierzchni wszystkich kropeł jak w danym zbiorze o określonym widmie rozpylenia, obliczano ze wzoru zaproponowanego przez Hiroyasu i Kadotę [5]:

$$d_{32} = A (\Delta p)^{-0,135} \rho_g^{0,121} V_{pj}^{0,131} [\mu m], \quad (6)$$

gdzie:

$\Delta p$  - nadciśnienie wtrysku (wartość średnia), Pa,

$V_{pj}$  - jednostkowa dawka paliwa, mm<sup>3</sup>/cykl,

$A$  - stała wtryskiwacza,  $A = 3,8$ .

Wartość wielkości  $A$  obliczono ze wzoru:

$$A = 3 + 0,28 \left( \frac{l}{d} \right), \quad (7)$$

gdzie dla badanego rozpylacza WZM, DSL-150 A-38 silnika AD3.152 jest:

$l$  – długość kanałika rozpylacza – 4 mm,

$d$  – średnica otworka rozpylacza – 0,28 mm.

Penetracja strugi paliwa zależy od różnicy ciśnienia wtrysku paliwa i ciśnienia w cylindrze, gęstości ośrodka gazowego  $\rho$  i gęstości cieczy  $\rho_p$ , zaś w mniejszym stopniu od średnicy otworka rozpylacza  $d$ . Według Hiroyasu [5] chwilową penetrację strugi można wyznaczyć z zależności:

Dla  $t \leq t_{rozpadu}$ ,

$$s = 0,39 \left( \frac{2(p_w - p_c)}{\rho_p} \right)^{1/2} t, \quad (8)$$

Dla  $t > t_{rozpadu}$ ,

$$s = 2,95 \left( \frac{2(p_w - p_c)}{\rho_o} \right)^{1/4} (d \cdot t)^{1/2}, \quad (9)$$

gdzie czas do chwili rozpadu wynosi:

$$t_{\text{rozpadu}} = \frac{29\rho_g d}{(\rho_o(p_w - p_c))^{1/2}} \quad (10)$$

W powyższych zależnościach oznaczono:

$p_w$  - ciśnienie wtrysku, Pa,

$p_c$  - ciśnienie w cylindrze, Pa,

$\rho_o, \rho_p$  - gęstość gazu i paliwa,  $\text{kg/m}^3$ .

Kąt rozpylenia strugi, wg Abramowicza [1] jest:

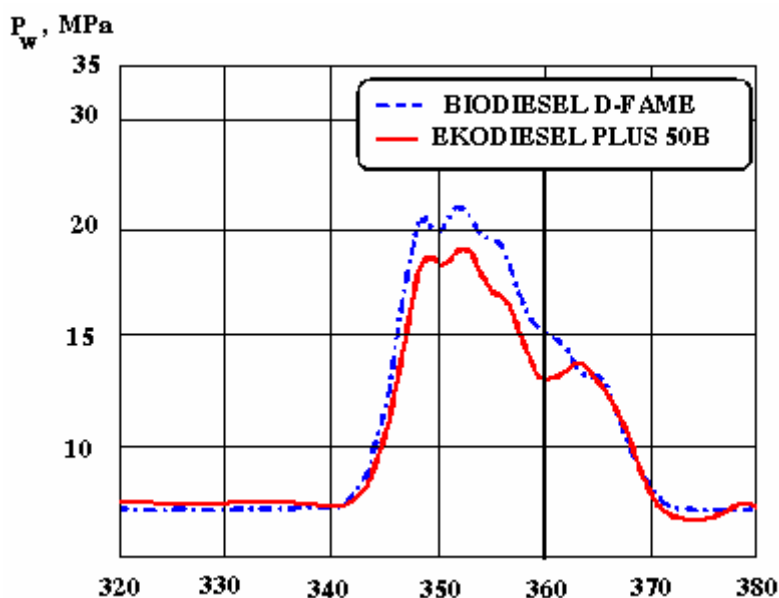
$$\text{tg} \frac{\theta}{2} = 0,13 \left[ 1 + \left( \frac{\rho_o}{\rho_p \cdot \Delta p} \right) \right], \quad (11)$$

gdzie:

$\Delta p$  - nadciśnienie wtrysku (wartość średnia), Pa,

## 5. Wyniki badań

Na rysunku 2, przedstawiono porównanie przebiegu ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym dla badanych paliw, przy prędkości obrotowej  $n = 1400$  obr/min, odpowiadającej maksymalnemu momentowi obrotowemu. W tabeli 2 przedstawiono maksymalne wartości ciśnienia w przewodzie wtryskowym, początkową i krytyczną prędkość strumienia wtryskiwanego paliwa do cylindra silnika AD3.152 pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i przy maksymalnym obciążeniu silnika.



Rys. 2. Przykładowe uśrednione zależności ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym od kąta obrotu wału korbowego, przy zasilaniu silnika AD3.152 różnymi paliwami i przy prędkości obrotowej silnika  $n=1400$  obr/min

Fig. 2. Exemplary dependences between fuel pressure in injection pipe versus crankshaft rotation angle for the engine AD3.152 fuelled with examined fuels the engine speed  $n= 1400$  rpm

Tabela 2. Maksymalne wartości ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i prędkość początkowa oraz prędkość krytyczna strumienia wtryskiwanego paliwa w silniku AD3.152 pracującym według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i przy obciążeniu silnika  $M_{omax}$  oraz  $n=1400$  obr/min, zasilanego różnymi paliwami

Table 2. Maximal values of fuel pressure in the injection pipe and initial and critical speed of the stream of injected fuel in the AD3.152 engine working according the external speed characteristic, at maximal load  $M_{omax}$  and  $n=1400$  rpm for investigated fuels

Rodzaj paliwa	Ciśnienie paliwa przed otwarciem rozpylacza	Prędkość początkowa strumienia	Prędkości krytyczne kropli
	$\Delta P$ , Pa	$w_p$ , m/s	$w_e$ , m/s
Paliwo naturalne EKODIESEL PLUS 50-B			
EKODIESEL PLUS 50-B	19 400	136,92	158,84
paliwo roślinne BIODIESEL D-FAME			
BIODIESEL D-FAME	23 600	149,80	164,18

Przy zasilaniu silnika paliwami roślinnymi występują wyższe ciśnienia paliwa przed otworem wylotowym z wtryskiwacza, co powoduje większe prędkości wypływu paliwa.

Tabela 3. Średnia średnica kropel paliwa wg. Sautera  
Table 3. Mean diameter of fuel drops according to Sauter

Nazwa parametru	Paliwo naturalne EKODIESEL PLUS 50-B	Paliwo roślinne BIODIESEL D-FAME
Dawka paliwa $Mm^3$ / cykl	54	50
Średnia średnica Sautera $d_{32}$ $\mu m$	40,2	38,85

Obliczone ze wzoru (10) czasy rozpadu na krople różnych paliw, chwilowe penetracje strugi obliczone wg wzoru (8, 9), przy  $n_{Momax}=1200$  obr/min i  $\rho_o=10,5$  kg/m<sup>3</sup> przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Czasy rozpadu na krople różnych paliw, chwilowa penetracja strugi paliwa przy  $n_{Momax}=1200$  obr/min  
Table 4. Time of fuel disintegration into drops and momentareons penetration of fuel stream at  $n_{Momax}=1200$  rpm

Parametr	Paliwo naturalne EKODIESEL PLUS 50-B	Paliwo roślinne BIODIESEL D-FAME
Czasy rozpadu [ms]	0,535	0,512
Chwilowa penetracja strugi [mm] dla $t \leq t_{rozpadu}$	129	137
Chwilowa penetracja strugi [mm] dla $t > t_{rozpadu}$	124	154

W tabeli 5 przedstawiono kąty rozpylenia różnych paliw, przy pracy silnika AD3.152 według charakterystyki obciążeniowej i prędkości obrotowej wału korbowego  $n=1400$  obr/min

Tabela 5. Kąty stożka rozpylenia paliw, przy pracy silnika AD3.152 wg charakterystyki obciążeniowej i prędkości obrotowej wału korbowego  $n = 1400$  obr/min

Table 5. Cone angle of investigated fuels atomization at the work of AD3.152 engine according to load characteristic and at the engine speed  $n = 1400$  rpm

Kąty rozpylenia	Paliwo naturalne EKODIESEL PLUS 50-B	Paliwo roślinne BIODIESEL D-FAME
Według Abramowicza $\text{tg } \Theta/2$	0,1384	0,1366
$\text{tg } \Theta/2$	$7, 50^\circ$	$7, 40^\circ$

## 7. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań silnika AD3.152 zasilanego paliwami ekologicznymi: tj. mineralnym EKODIESEL PLUS 50B oraz paliwem roślinnym BIODIESEL D-FAME i pracującego według charakterystyki obciążeniowej przy  $n=1400$  obr/min, można sformułować następujące wnioski:

- wartości uśrednionych przebiegów ciśnień różnych paliw w przewodzie wtryskowym są większe o 7.7% przy zasilaniu silnika paliwem roślinnym BIODIESEL D-FAME w porównaniu z paliwem węglowodorowym EKODIESEL PLUS 50B przy obciążeniu silnika  $M_{\text{omax}}$   $n=1400$  obr/min.

Ponadto badania wykazały, że:

- badane paliwa charakteryzują się porównywalnym napięciem powierzchniowym, zarówno paliw pochodzenia mineralnego jak i roślinnego,
- średnia średnica Sautera badanych paliw roślinnych jest mniejsza niż paliw węglowodorowych,
- średnice krytyczne kropeł  $d_{kr}$  paliw węglowodorowych są większe niż paliw roślinnych, głównie z uwagi na ich większe napięcie powierzchniowe,
- początkowe prędkości wtryskiwanego strumienia paliw roślinnych i węglowodorowych są porównywalne,
- czasy rozpadu badanych paliw i chwilowa penetracja strug dla badanych paliw okazały się porównywalne,
- celem jest prowadzenie dalszych badań procesów wtrysku paliwa przy zasilaniu silnika zarówno paliwami pochodzenia mineralnego jak i roślinnego.

## 8. Literatura

- [1] Abramowicz, G. N., Theory of Turbulent Jets M.I.T, Press Cambridge. Mas, 1963.
- [2] Dokumentacja stanowiska pomiarowego, IEPiM, Politechnika Radomska, Radom 2005.
- [3] Falkowski, H., Układy wtryskowe silników wysokoprężnych. WKŁ, Warszawa 1989.
- [4] PKN ORLEN S.A., Rafineria Trzebinia, Świadczenia jakości paliw, 2006.
- [5] Orzechowski, Z., Prywer, J., Rozpylanie cieczy, WNT, Warszawa 1991.