

COMPARISON OF PROCESS OF STREAM CREATION AND DIESEL OIL AND RAPE OIL ESTERS COMBUSTION IN THE RESEARCH COMBUSTION CHAMBER AT SINGLE- AND DIPHASE FUEL INJECTION

Cezary I. Bocheński*, Krzysztof Warsicki*, Anna M. Bocheńska**

* Politechnika Warszawska

** Instytut Transportu Samochodowego

Abstract

Test results of fuel spray preparation and combustion of diesel fuel and rape seed esters in an experimental chamber for one- and two-stage fuel injection are presented in the paper. Thermodynamics parameters (temperature and pressure) in combustion chamber were changed as well injection fuel parameters (pilot dose, main dose and interval between doses) were changed during testing.

Run combustion and heat development velocity are compared for tested fuels (Diesel fuel and rape seed esters). Fuel spray preparation process visualisation allowed establishing front spray velocity and extent versus time. From comparison of combustion run established that rape seed esters combustion is comparable to Diesel fuel combustion from energy balance point of view.

PORÓWNANIE PROCESU TWORZENIA STRUGI I SPALANIA OLEJU NAPĘDOWEGO I ESTRÓW OLEJU RZEPAKOWEGO W KOMORZE BADAWCZEJ PRZY JEDNO I DWUFAZOWYM WTRYSKU PALIWA

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań procesu tworzenia strugi paliwa i spalania oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego w komorze doświadczalnej, przy jedno i dwufazowym wtrysku paliwa. W czasie badań zmieniano parametry termodynamiczne (temperatura, ciśnienie) w komorze spalania oraz parametry wtryskiwanego paliwa (dawka pilotująca, dawka zasadnicza, przerwa między dawkami).

Przeprowadzono porównanie przebiegu spalania i szybkości wywiązywania ciepła dla badanych paliw. Wizualizacja procesu rozpylania paliwa pozwoliła na określenie drogi i szybkości czoła strugi w czasie. Z porównania przebiegu spalania wynika, że proces spalania estrów oleju rzepakowego jest porównywalny energetycznie z olejem napędowym.

1. Wstęp

Zmniejszające się zasoby i wzrost ceny ropy naftowej spowodowały zainteresowanie paliwami odnawialnymi. W silniku wysokoprężnym, mineralny olej napędowy można zastąpić estrami metylowymi oleju rzepakowego. Stosowanie biopaliw przynosi szereg korzyści społecznych i ekologicznych i jest zgodne z polityką agrarną Unii Europejskiej, która zakłada procentowy udział tych paliw w bilansie ogólnym w roku 2010, na poziomie 6%. W Polsce roczne zużycie oleju napędowego wynosi ok. 5,0 – 6,0 mln ton. Udział w tym zużyciu estrów oleju rzepakowego mógłby być na poziomie 300 – 400 tys. ton rocznie. We wszystkich krajach Unii Europejskiej wzrasta intensywnie udział biopaliw w zużyciu ogólnym paliw silnikowych. Powszechnemu stosowaniu estrów oleju rzepakowego, jako paliwa silnikowego stoją na przeszkodzie wyższe jego ceny w porównaniu z olejem napędowym oraz określone problemy techniczne, wynikające z różnic właściwości fizyko – chemicznych estrów w porównaniu z olejem napędowym.

2. Wpływ właściwości oleju mineralnego i estrów metylowych oleju rzepakowego na proces rozpylenia i spalania

W silniku wysokoprężnym ważnym procesem, decydującym o parametrach technicznych, zużyciu paliwa i toksyczności spalin, jest tworzenie mieszaniny paliwowo – powietrznej. W czasie przebiegu tego procesu zachodzą takie procesy fizyczne, jak tworzenie strugi, jej podgrzanie i odparowanie oraz dyfuzja par paliwa do czynnika roboczego. W rezultacie tych procesów powstaje określona ilość mieszaniny o parametrach niezbędnych do rozpoczęcia spalania.

Równoległe z procesami fizycznymi zachodzą przemiany i reakcje chemiczne w paliwie, prowadzące do wytworzenia pośrednich produktów utleniania, niezbędnych do rozwoju reakcji łańcuchowych.

Aby rozpoczął się samozapłon i spalanie paliwa, konieczne jest jednocześnie wytworzenie niezbędnej ilości mieszaniny oraz powstanie określonych pośrednich produktów reakcji utleniania. Te szybkozmienne, niejednorodne w czasie i przestrzeni przemiany zachodzą w okresie samozapłonu.

Odmienne właściwości oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego są przyczyną różnic w tworzeniu strugi paliwa i spalaniu. Celem przedstawionych badań było określenie odmienności tych procesów dla badanych paliw w różnych warunkach eksperymentu.

Na proces tworzenia strugi rozpylonego paliwa mają wpływ właściwości paliwa (lepkość, napięcie powierzchniowe, temperatura odparowania i inne), parametry termodynamiczne w komorze badawczej (temperatura, ciśnienie, zawilżenie) oraz parametry wtryskiwanego paliwa (ciśnienie wtrysku, natężenie przepływu). Proces samozapłonu i spalania zależą natomiast od takich właściwości paliwa, jak liczba cetanowa, skład frakcyjny, wartość opałowa, temperatura zapłonu, skład chemiczny i inne. Przedstawione badania miały na celu ocenę procesu tworzenia strugi i spalania dla dwóch handlowych paliw o określonych w badaniach laboratoryjnych właściwościach.

W najnowszej generacji silników wysokoprężnych stosowany jest wysokociśnieniowy, elektronicznie sterowany system doprowadzenia paliwa (Common Rail), umożliwiający realizację dwufazowego wtrysku paliwa.

Przeprowadzone zostaną badania wpływu tego sposobu podawania paliwa na proces rozpylenia i spalania badanych paliw.

3. Stanowisko badawcze. Metodyka badań

1.1. Stanowiska badawcze

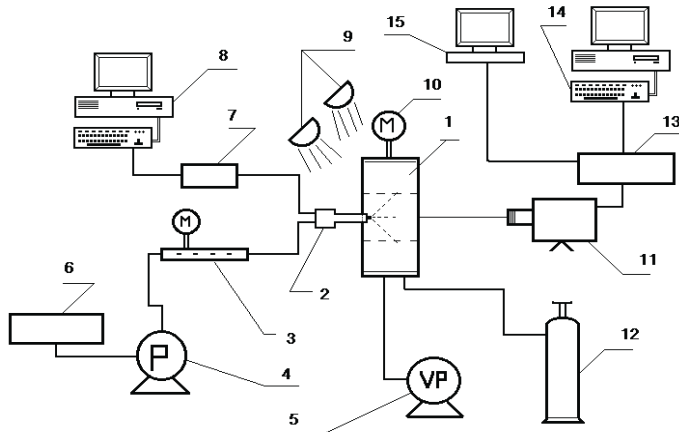
Schemat stanowiska przedstawia rysunek 1.

Głównym elementem stanowiska jest wymienna komora o stałej objętości (bomba) (1), umożliwiająca badanie procesu wtrysku oraz spalania. Stanowisko wyposażone jest w następujące układy funkcjonalne:

- układ doprowadzenia paliwa (Common Rail) z elektronicznym sterowaniem wielofazowego wtrysku (2, 3, 4, 6),
- układ sterowania czasem wtrysku (7, 8),
- układ rejestracji procesów przy użyciu kamery cyfrowej Photron Fastcam, umożliwiający rejestrację procesu wtrysku z prędkością 18000 klatek/sek. (11, 13, 14, 15),
- układ zasilania powietrzem (12),
- układ pomiaru ciśnienia spalania w komorze,
- zespoły dodatkowe (oświetlacze, pompa próżniowa).

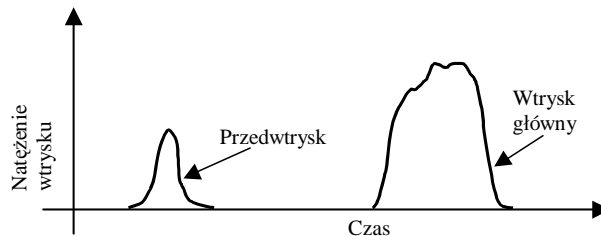
Komory badawcze umożliwiają wizualizację procesu wtrysku i spalania oraz podgrzewanie czynnika w zakresie temperatur 400 – 700°C.

Układ sterowania pozwala na zmianę wielkości dawki pilotującej (t_p) i zasadniczej (t_z) początku wtrysku, przerwy czasowej między dawkami (t_{ow}) oraz ciśnienia początku wtrysku (rys. 2).



1 - komora badawcza, 2 - wtryskiwacz, 3 - akumulator ciśnieniowy, 4 - pompa wtryskowa, 5 - pompa próżniowa, 6 - układ sterowania ciśnieniem wtrysku, 7 - układ sterowania czasem wtrysku (moduł), 8 - komputer programowania czasów wtrysku (dawki pilotującej, przerwy, dawki zasadniczej), 9 - oświetlacz, 10 - manometr ciśnienia wstępnego w komorze, 11 - kamera, 12 - butla ze sprężonym powietrzem, 13 - zasilacz kamery, 14 - komputer do rejestracji danych, 15 - monitor kontrolny

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Research facility scheme



Rys. 2. Przebieg dwufazowego wtrysku paliwa
Fig. 2. Diphase fuel injection run.

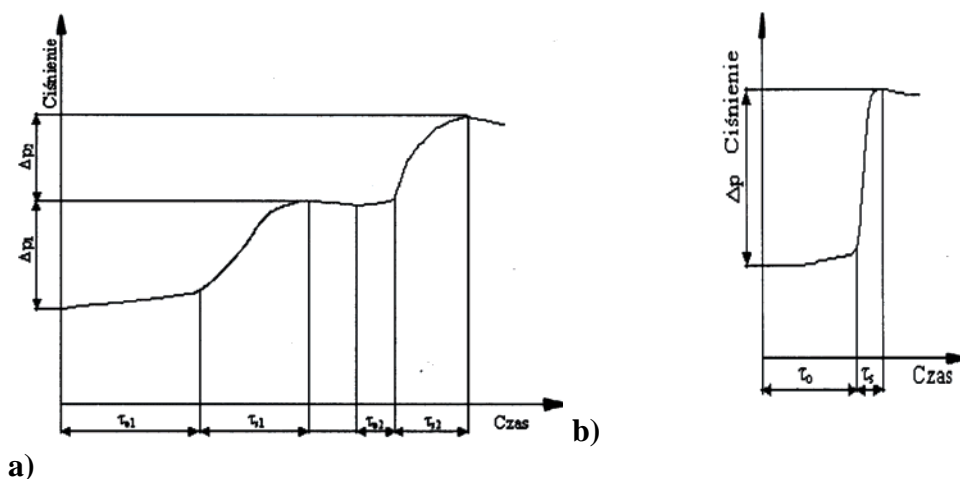
Stanowisko badawcze jest w pełni zautomatyzowane.

Proces rozpylania paliwa rejestrowany przy użyciu kamery pozwalał na określenie drogi i prędkości czoła strumienia paliwa. Możliwa była również ocena kształtu strugi.

Badania procesu tworzenia strugi wykonano dla ciśnienia otwarcia wtryskiwacza 70 MPa i 140 MPa oraz przeciwcisnienia w komorze równym 0,9 MPa. Czas między dawką pilotującą i zasadniczą wynosi 0,01s. Parametry procesu spalania określono z przebiegu ciśnienia, zgodnie z oznaczeniami jak na rys. 3.

Za parametry procesu uznano: τ_0 – opóźnienie samozapłonu, τ_s – czas spalania oraz Δp – przyrost ciśnienia. W przypadku spalania dwufazowego odróżniono opóźnienie samozapłonu przy wtrysku dawki pilotującej oraz zasadniczej. Przy ciśnieniu w komorze 0,9 MPa, współczynnik nadmiaru powietrza wynosił $\lambda = 2$, przy określonej wielkości dawki paliwa. Przebieg spalania badano dla trzech temperatur powietrza 400°C, 500°C, 600°C.

Porównano proces rozpylania i spalania oleju napędowego (ONM Standard 50) i estrów metylowych oleju rzepakowego, których właściwości podano w tabeli (tabela 1).



Rys. 3. Zmiana ciśnienia w czasie spalania a) – wtrysk dwufazowy, b) – wtrysk jednofazowy
 Fig. 3. The pressure change during the combustion process a) diphase injection b) single phase injection

2.2. Metodyka badań

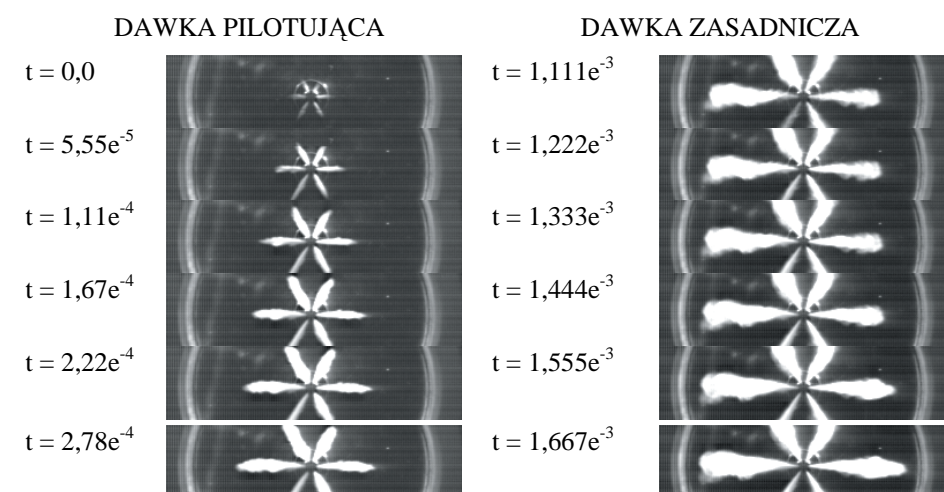
Tabela 1. Właściwości oleju napędowego ONM Standard 50 oraz estrów metylowych oleju napędowego Epal
 Table 1. Properties of diesel oil ONM Standard 50 and methyl esters of Epal diesel oil

Lp.	Badany parametr	Jednostka	Estry metylowe oleju napędowego Epal	Olej napędowy ONM Standard 50
1.	Gęstość w temperaturze 15°C	kg/m ³	885,3	818
2.	Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	- 8	- 34
3.	Pozostałość po koksowaniu	% (m/m)	0,9	0,01
4.	Ocena smarności z użyciem aparatu o ruchu posuwisto – zwrotnym wysokiej częstotliwości (HFRR)	µm	165	437
5.	Lepkość kinetyczna w temp. 40°C	mm ² /s	4,719	1,8
6.	Liczba cetanowa	-	55	51,2
7.	Indeks cetanowy	-	50,2	50,1
8.	Temperatura mętnienia	°C	- 3	- 33
9.	Temperatura zapłonu	°C	166	62
10.	Zawartość siarki	mg/kg	1	9,0
11.	Oznaczenie liczby jodowej	gJ/100g	3,0	
12.	Badanie działania korodującego na metale	°korozji	1	1
13.	Zawartość popiołu	% (m/m)	0,002	0,001
14.	Zawartość zanieczyszczeń	mg/kg	14	9
15.	Zawartość wody	mg/kg		9,0
16.	Odporność na utlenianie, całkowite osady nierozpuszczalne	g/m ³		8
17.	Zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych	%(m/m)		2,5
18.	Skład frakcyjny	°C		
	20% destyluje do temperatury		334	
	40% destyluje do temperatury		336	
	60% destyluje do temperatury		336	
	80% destyluje do temperatury		339	
	95% destyluje do temperatury		343	
	koniec destylacji		345	
	Do temp. 190°C destyluje	% (V/V)		3,0
Do temp. 240°C destyluje			59,0	
Do temp. 290°C destyluje			97,0	

4. Badania procesu tworzenia strugi oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego przy dwufazowym wtrysku paliwa

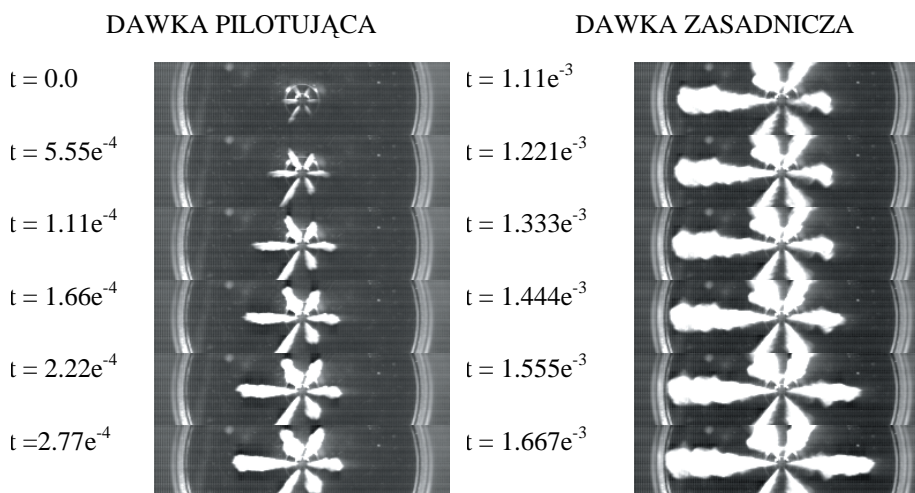
Badania przeprowadzono dla oleju napędowego ONM Standard 50 i estru oleju rzepakowego Epal o właściwościach podanych w tabeli 1. Celem badań było określenie różnic w tworzeniu strugi obu paliw, przy ciśnieniu wtrysku 60 MPa i 120 MPa i przeciwcisnieniu w komorze badawczej 1,5 MPa oraz przerwie czasowej między dawkami 0,01s.

Przebieg procesu tworzenia strugi dla dawki pilotującej i zasadniczej obu paliw przy ciśnieniu wtrysku 120 MPa przedstawia rysunek 4.



Estry metylowe oleju rzepakowego

$p_1 - 1,5 \text{ MPa}$, $p_2 - 120 \text{ MPa}$, $t_1 - 110$, $t_2 - 1000 \mu\text{s}$, $t_3 - 1000 \mu\text{s}$



Olej napędowy

$p_1 - 1,5 \text{ MPa}$, $p_2 - 120 \text{ MPa}$, $t_1 - 110 \mu\text{s}$, $t_2 - 1000 \mu\text{s}$, $t_3 - 1000 \mu\text{s}$

Rys. 4. Przebieg tworzenia strugi dla oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego

Fig. 4. The stream creation run for diesel oil and rape oil esters

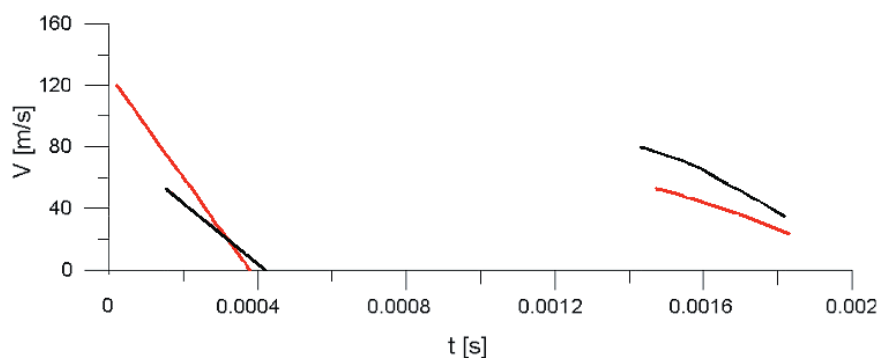
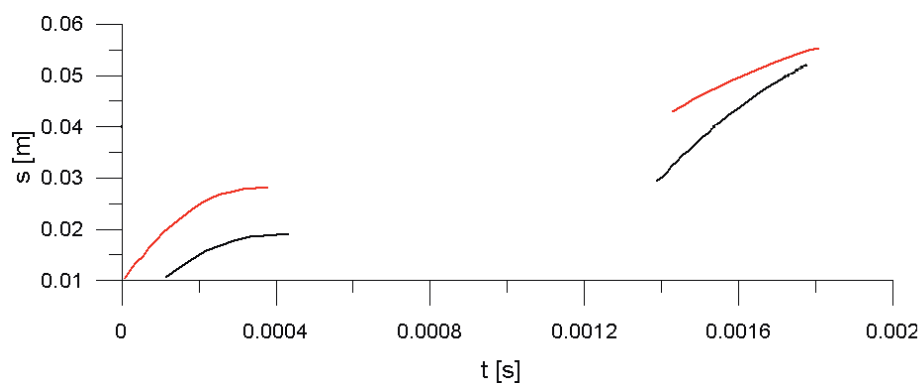
Na podstawie zarejestrowanych kamerą filmową kolejnych faz wtrysku, wykonano wykresy drogi i prędkości czoła strugi paliwa dla obu paliw, które przedstawia rysunek 5.

Z porównania obrazów strugi paliwa w określonym czasie, wynika nieco większy zasięg strugi dla estrów oleju rzepakowego, co należy tłumaczyć większą wartością lepkości tego paliwa. Struga jest przy tym bardziej zwarta. Badania przy ciśnieniu 60 MPa potwierdzają tą zależność.

5. Porównanie przebiegu spalania oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego

Badania przeprowadzono dla oleju napędowego ONM Standard 50 i estrów oleju rzepakowego Epal o właściwościach podanych w tabeli1, przy podawaniu paliwa jedno – i dwufazowym oraz ciśnieniu początku wtrysku 70MPa i 140 MPa, temperaturach początkowych powietrza w komorze 400°C, 500°C i 600°C, przeciwcisnieniu 0,9 MPa (współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda= 2$).

Przebieg spalania i szybkości wywiązywania ciepła przy wtrysku jednofazowym i ciśnieniu początku wtrysku paliwa 70 MPa oraz temperaturze powietrza w komorze 500°C i 600°C przedstawia rysunek 6 i 7.

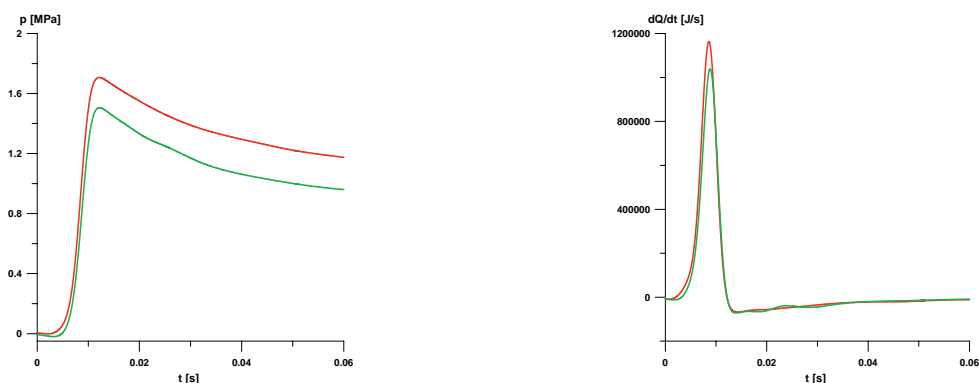


$p_1=1,5$ MPa, $p_2= 120$ MPa, $t_1=110\mu s$, $t_2=1000\mu s$, $t_3=1000\mu s$

Wykresy: $s=f(t)$, $v=f(t)$, $v=v(s)$

- Olej napędowy
- Estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 5. Wykresy drogi i prędkości czola strugi oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego
Fig. 5. Graph of path and speed of stream front of diesel oil and rape oil esters



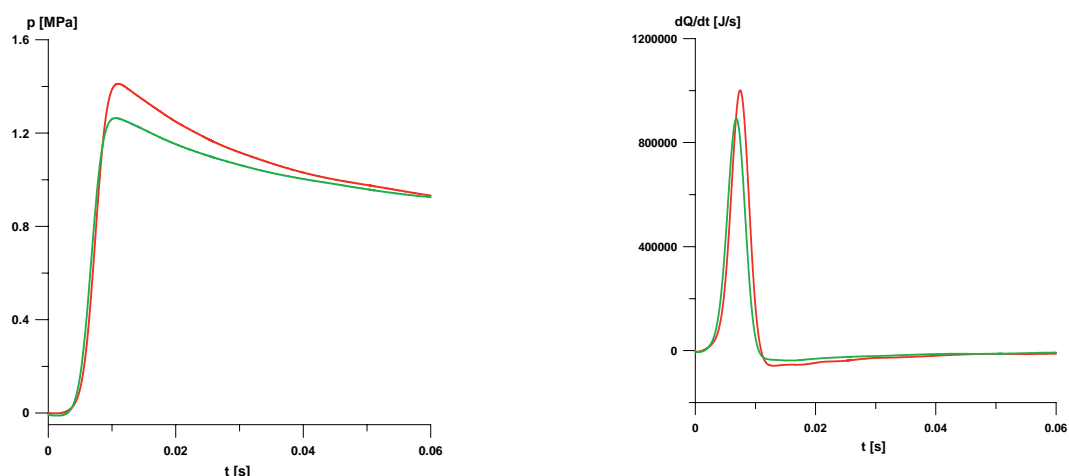
$\lambda = 2$, $t = 500^{\circ}\text{C}$, $p = 0,9 \text{ Mpa}$, $p_{\text{wtr}} = 70 \text{ MPa}$

— - olej napędowy

— - estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 6. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk jednofazowy

Fig. 6. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rape oil. Single phase injection



$\lambda = 2$, $t = 600^{\circ}\text{C}$, $p = 0,9 \text{ Mpa}$, $p_{\text{wtr}} = 70 \text{ MPa}$

— - olej napędowy

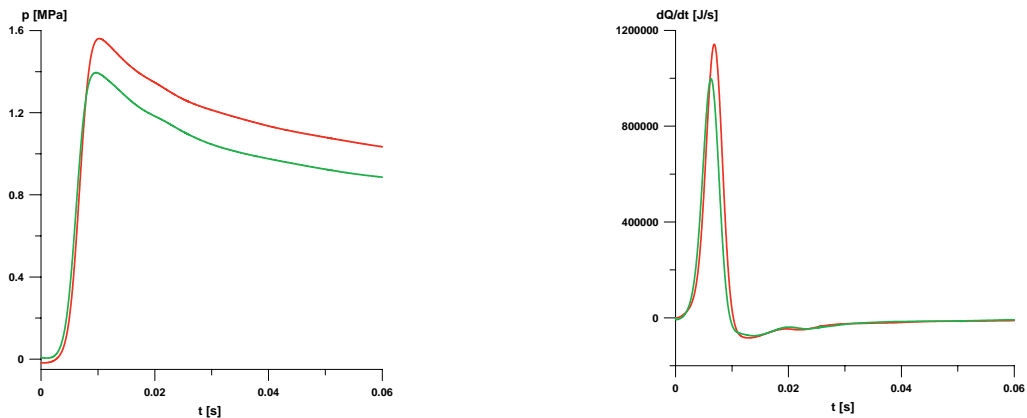
— - estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 7. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk jednofazowy.

Fig. 7. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rape oil. Single phase injection

Przy spalania estrów w temperaturze 500°C stwierdzono dłuższy okres opóźnienia samozapłonu oraz niższe wartości największego ciśnienia spalania i szybkości wydzielania ciepła dQ/dt w stosunku do oleju napędowego (rys. 6).

Ze wzrostem temperatury do 600°C , okres opóźnienia samozapłonu estrów był mniejszy niż dla oleju napędowego, podobnie jak w niższej temperaturze, maksymalne wartości ciśnienia w komorze oraz szybkości wydzielania ciepła były wyższe dla oleju napędowego. Wzrost ciśnienia wtrysku paliwa do wartości 140 MPa spowodował dalsze skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu, oraz zwiększenie maksymalnych wartości ciśnienia spalania i prędkości wywiązywania ciepła, co dla temperatury 600°C , przedstawia rysunek 8.



$\lambda = 2, t = 600^{\circ}\text{C}, p = 0,9 \text{ Mpa}, p_{\text{wtr}} = 140 \text{ MPa}$

— - olej napędowy
— - estry metylowe oleju rzepakowego

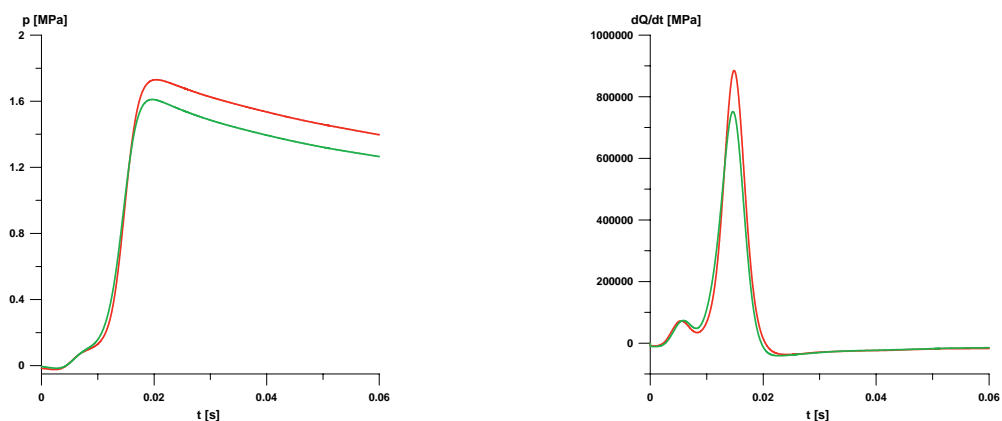
Rys. 8. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk jednofazowy.

Fig. 8. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rapeseed oil. Single phase injection

Z przeprowadzonych badań porównawczych procesu spalania oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego przy jednofazowym wtrysku paliwa, w temperaturach powietrza 500°C i 600°C wynika, że wartości największego ciśnienia spalania i szybkości wywiązywania ciepła były niższe dla estrów oleju rzepakowego. Szybkości narastania ciśnienia w czasie spalania są zbliżone.

Ze wzrostem ciśnienia wtrysku następowała poprawa procesu spalania, ale zależności były podobne.

Następnie przeprowadzono badania w tych samych warunkach, przy dwufazowym wtrysku, przy tej samej dawce badanych paliw. Przebieg zmiany ciśnienia spalania w czasie oraz szybkości wywiązywania ciepła dla obu paliw w temperaturze powietrza 500°C i ciśnieniu wtrysku 70 MPa , przedstawia rysunek 9, a przy temperaturze 600°C rysunek 10.

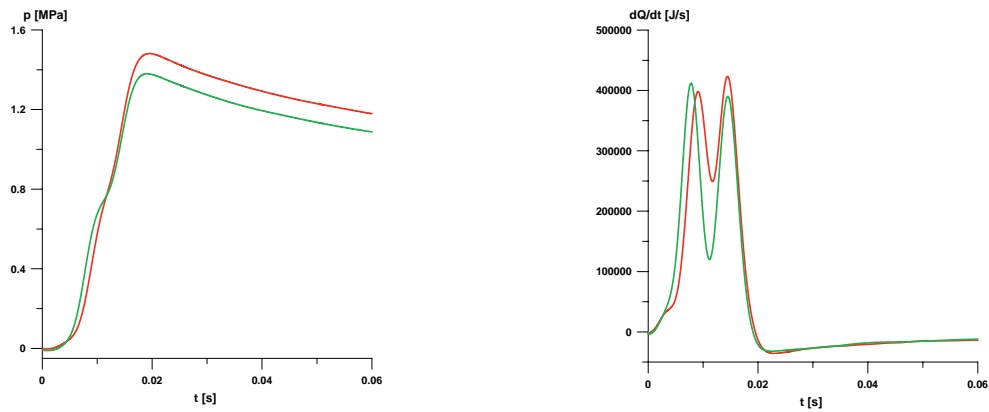


$\lambda = 2, t = 500^{\circ}\text{C}, p = 0,9 \text{ Mpa}, p_{\text{wtr}} = 70 \text{ MPa}$

— - olej napędowy
— - estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 9. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk dwufazowy. Czas przerwy między wtryskami $10000 \mu\text{s}$

Fig. 9. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rapeseed oil. Diphase injection. Brake time between injections $10000 \mu\text{s}$



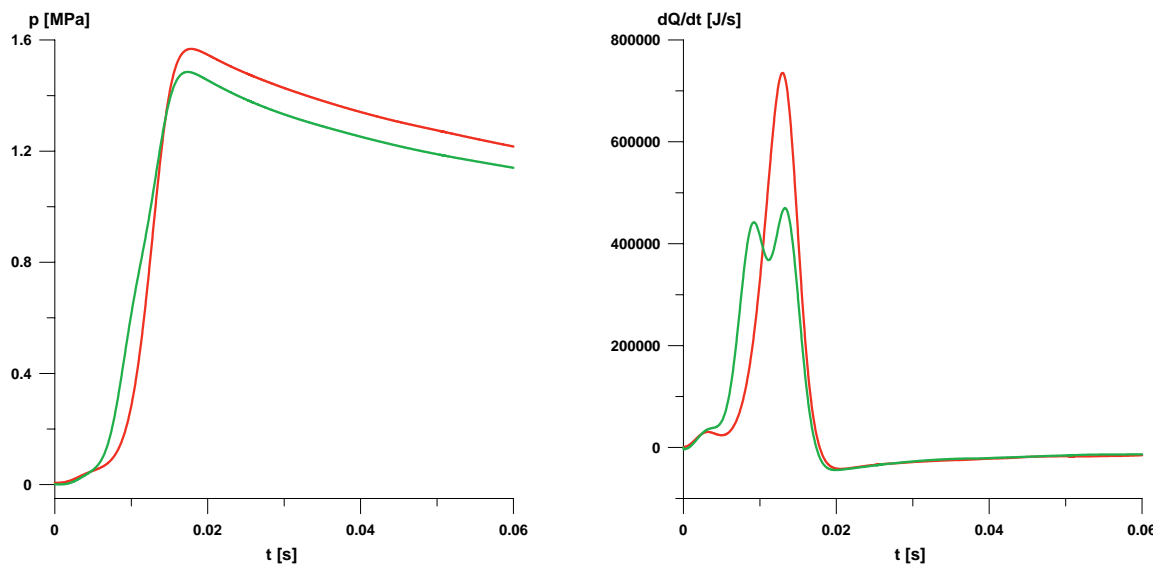
$\lambda = 2$, $t = 600^{\circ}\text{C}$, $p = 0,9 \text{ Mpa}$, $p_{\text{wtr}} = 70 \text{ MPa}$

— olej napędowy
— estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 10. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk dwufazowy. Czas przerwy między wtryskami $10000\mu\text{s}$

Fig. 10. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rapeseed oil. Diphase injection. Brake time between injections $10000 \mu\text{s}$

Porównując przebiegi spalania obu paliw można stwierdzić zupełnie odmienny przebieg procesu, jak przy wtrysku jednofazowym. Nastąpiło wydłużenie okresu samozapłonu, zmniejszenie szybkości narastania ciśnienia oraz obniżenie wartości szybkości wywiązywania ciepła. Wzrost temperatury powietrza w komorze do 600°C spowodował pojawienie się zauważalnego przegięcia przy narastaniu ciśnienia oraz wystąpienie dwóch ekstremów w przebiegu szybkości wywiązywania ciepła. Zwiększenie ciśnienia wtrysku do 140 MPa zmieniło charakter przebiegu szybkości wywiązywania ciepła, co przedstawia rysunek 11.



$\lambda = 2$, $t = 600^{\circ}\text{C}$, $p = 0,9 \text{ Mpa}$, $p_{\text{wtr}} = 140 \text{ MPa}$

— olej napędowy
— estry metylowe oleju rzepakowego

Rys. 11. Porównanie przebiegów ciśnienia w komorze i dQ/dt dla dwóch paliw: olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego. Wtrysk dwufazowy. Czas przerwy między wtryskami $10000\mu\text{s}$

Fig. 11. Comparison of pressure run in the chamber and dQ/dt for two fuels: diesel oil and methyl ester of rapeseed oil. Diphase injection. Brake time between injections $10000 \mu\text{s}$

Zarówno w jedno jak i dwufazowym wtrysku paliwa mineralnego i roślinnego przy ich spalaniu występowały znaczne różnice, które można tłumaczyć odmiennością właściwości paliw mineralnych i roślinnych.

6. Wnioski końcowe

Na podstawie badań porównawczych procesu tworzenia strugi oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego stwierdzono:

- estry oleju rzepakowego o lepkości większej od oleju napędowego, charakteryzowały się większą prędkością czoła strugi oraz mniejszym rozpyleniem (struga bardziej zwarta),
- dawka pilotująca nie osiągnęła w warunkach eksperymentu ścianki komory, kiedy rozpoczął się wtrysk dawki zasadniczej.

Na podstawie przebiegu procesu spalania paliw badawczych można stwierdzić:

- przy wtrysku jednofazowym i ciśnieniu wtrysku 70 MPa uzyskiwano zbliżone wartości opóźnienia samozapłonu, natomiast przy spalaniu estrów oleju rzepakowego uzyskiwano mniejsze wartości największego ciśnienia spalania oraz prędkości wydzielania ciepła dla obu temperatur powietrza w komorze. W wyższej temperaturze osiągnięto mniejsze wartości parametrów procesu spalania. Wzrost ciśnienia wtrysku do 140 MPa nie zmienił relacji jakościowych przy spalaniu tych paliw,
- przy wtrysku dwufazowym i ciśnieniu wtrysku 70 MPa, dla obu temperatur powietrza stwierdzono odmienny przebieg zmiany ciśnienia podczas spalania. Nastąpiło wydłużenie czasu spalania przy zmniejszeniu wartości maksymalnych ciśnienia spalania i szybkości wywiązywania ciepła. Relacje jakościowe porównywanych parametrów spalania były podobne jak przy wtrysku jednofazowym,
- przez zmianę sposobu doprowadzenia paliwa, ciśnienia wtrysku oraz parametrów termodynamicznych, możliwe jest kształtowanie przebiegu spalania.

7. Literatura

- [1] Bocheński C. I., Biodiesel paliwo rolnicze. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 2003.
- [2] Bocheński C. I., Bocheńska A., Badania właściwości mieszaniny oleju napędowego z estrami metylowymi oleju rzepakowego. V Jubileuszowa Międzynarodowa Konferencja Naukowo – Techniczna nt. "Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa" MOTROL 2005.
- [3] Projekt badawczy KBN nr rej. 5 T12D 017 23. Pt. „Badania wpływu parametrów wtrysku i właściwości paliwa na proces spalania w silniku z zapłonem samoczynnym, przy zastosowaniu zasobnikowego układu paliwowego (Common Rail)” Kierownik projektu: Cezary I. Bocheński.