

RESEARCH ON GAS OIL AND RAPE OIL METHYL ESTERS SPRAYED IN CONSTANT VOLUME CHAMBER

Cezary I. Bocheński*, Paweł Oleszczak**, Stanisław Siwiec**

*) Politechnika Warszawska, Instytut Inżynierii Mechanicznej
Wydział Budownictwa, Mechaniki i Petrochemii
09-400 Płock, ul. Jachowicza 2/4

tel./fax. (24) 2626542, e-mail: iim@pw.plock.pl

***) Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25
tel. (22) 660 52 66, e-mail: polesz@itc.pw.edu.pl

Abstract

Research of gas oil and rape oil methyl esters spraying in a constant volume chamber at different injection pressure and counterpressure are presented.

BADANIA PROCESÓW ROZPYLANIA OLEJU NAPĘDOWEGO I ESTRÓW METYLOWYCH OLEJU RZEPAKOWEGO W KOMORZE O STAŁEJ OBJĘTOŚCI

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań procesu rozpylania oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego w komorze o stałej objętości przy różnych ciśnieniach wtrysku i przeciwcisnieniu w komorze.

1. Wstęp

Przez dziesiątki lat konstrukcja silnika wysokoprężnego przystosowywana była do spalania oleju napędowego. Również technologie przeróbki ropy naftowej doskonalone były pod względem uzyskania najkorzystniejszych właściwości fizykochemicznych do zastosowania w silniku spalinowym. Coraz bardziej rygorystyczne granice emisji związków toksycznych, spowodowały szukanie nowych możliwości ich obniżenia. Jedną z nich jest dobór właściwości oleju napędowego pod kątem obniżenia toksyczności spalin (obniżenie zawartości siarki, ograniczenie ilości węglowodorów aromatycznych, odpowiedni skład frakcyjny i inne). Wprowadzone zostaną biopaliwa uzyskane z przeróbki rzepaku w postaci estrów metylowych oleju rzepakowego. Biodiesel różni się w pewnym zakresie podstawowymi właściwościami w stosunku do paliwa mineralnego. Jak te różnice będą wpływały na przebieg podstawowych procesów w silniku? Jakie niezbędne są adaptacje silnika do spalania paliw rzepakowych? W jakiej wreszcie formie możliwe jest stosowanie olejów rzepakowych.

Odpowiedzi na te pytania można uzyskać w badaniach podstawowych i eksploatacyjnych [1].

Są w zasadzie dwie możliwości wykorzystania olejów rzepakowych do spalania w silniku:

- przystosowania silnika do spalania oleju rzepakowego,
- przystosowanie paliw z oleju rzepakowego do spalania w silniku.

Pierwszą możliwość zrealizowano wprowadzając udaną specjalną konstrukcję silnika do spalania surowego oleju rzepakowego (silnik Elbett). Druga możliwość polega na dostosowaniu właściwości paliwa do spalania w silniku. Paliwa rzepakowe można stosować w różnej formie, jako:

- surowy olej rzepakowy (specjalny silnik),
- estry oraz ich mieszaniny z olejem napędowym,
- emulsje (z wodą) estrów i oleju napędowego,
- olej rzepakowego przerabiany z ropą naftową w rafineriach.

Wszystkie te formy można nazwać biopaliwem. Proporcje zawartości składników (komponentów) biopaliw należy przyjmować ostrożnie, korzystając z doświadczeń innych krajów. Wartości tych składników zależą bowiem od takich czynników jak:

- stabilności właściwości oleju rzepakowego,
- dyscyplina w sporządzaniu mieszanek,
- parametry silnika,
- stan techniczny eksploatowanych silników i inne.

Stosowanie estrów oleju rzepakowego do silników wysokoprężnych jest możliwe.

Odmienność cech biopaliw i paliw mineralnych, powoduje obawy niektórych producentów, przede wszystkim ze względu na brak wystarczających badań, również w obszarze badań podstawowych.

2. Różnice właściwości fizyko – chemicznych olejów napędowych i rzepakowych

Właściwości paliw mineralnych i rzepakowych różnią się ze względu na różnice surowców wyjściowych od ich wytwarzania – ropy naftowej i rzepaku.

Oleje napędowe są to frakcje naftowe, stanowiące mieszaninę ciekłych węglowodorów o temperaturze wrzenia od 180°C do 350°C. Frakcje te są wydzielane z ropy naftowej przez destylację lub wytwarzane z olejów ciężkich i pozostałości w rafineryjnych procesach rozkładowych, jak krakowanie katalityczne i hydrokrakowanie.

Skład oleju napędowego decyduje o właściwościach fizyko- chemicznych, a te z kolei o charakterystyce eksploatacyjnej, zarówno pod względem efektywności pracy silnika jak i toksyczności emitowanych przez silnik produktów spalania.

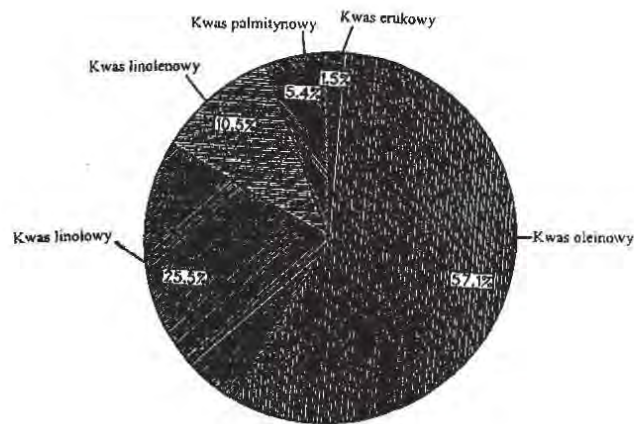
Olej napędowy jest mieszaniną bardzo wielu węglowodorów, z których podstawowymi są:

- parafiny normalne C_nH_{2n+2} posiadające najniższy ciężar właściwy i najwyższą liczbę cetanową LC ,
- izoparafiny o rozgałęzionych łańcuchach i tym samym jak parafiny normalne stosunku węgla do wodoru oraz nieco niższej liczbie cetanowej,
- parafiny pierścieniowe, nafteny, olefiny o wzorze C_nH_{2n} , wyższych ciężarach właściwych i niskiej liczbie cetanowej,
- aromaty z jednym lub wieloma pierścieniami benzenowymi C_6H_6 o wysokich ciężarach właściwych i niższej od związków parafinowych LC ,
- nafteny o zwartych pierścieniach benzenowych, najwyższym ciężarze właściwym i najniższej LC .

W zależności od ilości powyższych związków węglowodorowych w oleju napędowym zmieniają się takie własności, jak – liczba cetanowa, temperatura samozapłonu, lepkość, napięcie powierzchniowe, lotność, skłonność do nagarowania i inne.

Olej rzepakowy, jak wszystkie oleje roślinne, składa się z trójwartościowego alkoholu (gliceryny) i jednego, dwóch lub trzech kwasów tłuszczowych. Trójglicerydy stanowią 97% olejów roślinnych, tzn. wszystkie trzy grupy OH gliceryny są zastąpione przez jednakowe lub różne pozostałości kwasów tłuszczowych, składających się najczęściej ze związków

węglowodorowych lub pozostałości węglowych. Budowę cząstki kwasu tłuszczowego przedstawia Rys. 1



Rys. 1. Budowa cząstki kwasu tłuszczowego
Fig. 1. Fatty acid particle structure

Istotną różnicą w stosunku do oleju mineralnego jest zawartość w oleju rzepakowym ok. 12% tlenu. Zawartość tlenu zmniejsza wartość opałową. Jeżeli wszystkie grupy OH gliceryny są zajęte przez kwasy tłuszczowe, pozostaje cząstka oleju rzepakowego o ciężarze molekularnym 800 – 1000 g/mol (wzór ogólny $C_{54}H_{114}O_6$). Olej napędowy przy wzorze sumarycznym $C_{16}H_{34}$ ma znacznie mniejszy ciężar molekularny ok. 226 g/mol. Są glicerydy, w których cząstki gliceryny przereagowane są z trzema cząstkami jednakowych kwasów. Trójglicerydy olejów naturalnych zawierają co najmniej dwa różne kwasy tłuszczowe. Rodzaj kwasów tłuszczowych i ich rozdział w cząstce trójglicerdu określają chemiczno-fizyczne i biologiczne właściwości oleju i związane z tym możliwości stosowania. Głównymi składnikami oleju rzepakowego są nienasycone kwasy tłuszczowe, przy czym kwasy tłuszczowe stanowią ok. 60%, podczas gdy kwasy linolowe ok. 20%, a kwasy linolenowe ok. 10%. Nasycone kwasy tłuszczowe występują w niewielkich ilościach. Przykładowy skład oleju rzepakowego jest następujący: C – 77%, H – 10%, O_2 – 10,5%. Wartość opałowa takiego oleju wynosi 36,7 MJ/kg.

Inną istotną różnicą między olejem rzepakowym a napędowym jest mniejsza zawartość węgla (oprócz dużej zawartości tlenu). Trójglicerydy surowego oleju rzepakowego zbudowane są z bardzo dużych cząsteczek, których spalanie jest bardzo trudne. Problemy w stosowaniu jako paliwa oleju rzepakowego wynikają ze znacznie większej niż w oleju napędowym masy molowej. W następstwie tego lepkość oleju rzepakowego jest kilkakrotnie większa jak oleju napędowego. Ponadto występują problemy z zachowaniem płynności w stosunkowo wysokiej temperaturze i przy rozruchu. Olej rzepakowy wymaga wysokiej temperatury do odparowania paliwa, co jest przyczyną odkładania się niespalonego paliwa na elementach silnika. Właściwości oleju rzepakowego określone są przez długość łańcucha kwasów tłuszczowych, ilość kwasów nienasyconych oraz liczbę i położenie wiązań podwójnych. Związane z budową chemiczną właściwości paliwa wymagają standaryzacji przy ich stosowaniu.

Porównanie właściwości oleju napędowego, oleju rzepakowego i estrów metylowych oleju rzepakowego przedstawia Tabela I.

Tabela 1. Porównanie właściwości oleju napędowego, oleju rzepakowego i estrów metylowych oleju rzepakowego

Table 1. Comparison of gas oil, rape oil and rape oil methyl esters properties

Wyszczególnienie	Olej napędowy		Olej rzepakowy	Estry metylowe oleju rzepakowego
	Wartość śr.	Zakres rozrzutu		
1	2		3	4
Gęstość [kg/dm^3] (15°C)	0,83	0,817 – 0,856	0,91 – 0,92	0,86 – 0,9
Lepkość kinetyczna (mm^2/sec) (20°C)	3,80	2,90 – 5,50	68 – 97,7	6 – 9
Wartość opałowa (MJ/kg)	42,7 – 43,5		36,7 – 37,7	37,02 – 37,2
Liczba cetanowa LC	52,3	47,10 – 58,60	40 – 44	45 – 59
Masa molowa (kg/kmol)	120 – 320		882 – 883	296
Stechiometryczne zapotrzebowanie na tlen ($\text{kg}_{\text{powietrza}}/\text{kg}_{\text{paliwa}}$)	14,57		12,43	12,5
Analiza elementarna				
C (%)	86,0 – 86,4		77,0 – 78,0	76,8 – 78,0
H (%)	13,40 14,0		10,0 – 11,7	12,1
O (%)	-		10,5 – 12,0	10,0 – 11,0
CFPP ($^\circ\text{C}$)	+2 - 35		+5....+18	- 7....- 9
Liczba Conradsona (M%)	0,01 – 0,04		<0,01 – 0,5	<0,01 – 0,05
Zawartość siarki (%)	0,137	0,03 – 0,22	0,009 – 0,012	0,002 – 0,006
Temperatura zapłonu ($^\circ\text{C}$)	53,0	20 - 84	317 – 324	111 – 175
Zawartość zw. aromatycznych (%)	21,5		-	-

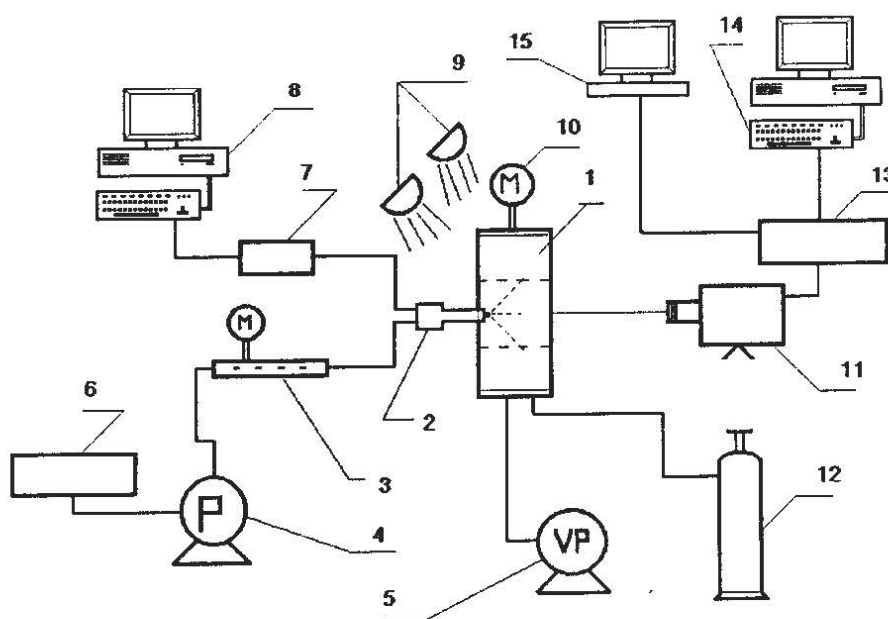
Największą zależność od właściwości nasion roślin oleistych, również rzepaku, wykazują: gęstość, wartość opałowa, lepkość kinetyczna i temperatura zapłonu. Naturalne różnice gęstości (0,9 do 0,93 kg/l) można kompensować przez regulację pompy. Pamiętać przy tym należy, że gęstość paliwa zmienia się wraz z temperaturą. Lepkość kinetyczna oleju nie powinna przekraczać 80 mm^2/s , przy tym jest i tak kilkakrotnie wyższa od lepkości oleju napędowego (2,9 – 5,5 mm^2/s). Duża wartość lepkości powoduje gorsze rozpylenie paliwa, większy zasięg strugi i natryskiwanie paliwa na ścianki komory spalania. Powoduje to pogorszenie spalania oraz rozcieńczenie paliwem oleju smarującego. Duża lepkość oleju jest też przyczyną powstawania osadów w komorze i na końcówkach wtryskowych. Liczba kwasowa ze względu na obecność wolnych kwasów tłuszczowych nie powinna przekraczać 1,5 KOH/g oleju, co oznacza ilość wodorotlenku sodu niezbędną do neutralizacji wolnych kwasów tłuszczowych zawartych w 1 gramie paliwa. Niezbędne jest ograniczenie liczby jodowej wskazującej na obecność nienasyconych kwasów tłuszczowych, odpowiedzialnych za odkładanie osadów. Ograniczenie zawartości wody do 0,1 % jest niezbędne ze względu na polimeryzację kwasów tłuszczowych i możliwość zatarcia elementów układu paliwowego.

Niektóre właściwości olejów rzepakowych trudno jest bezpośrednio porównać z olejem mineralnym, ze względu na znaczne różnice surowca, z którego są produkowane. Niezbędne jest przeprowadzenie badań porównawczych procesów podstawowych.

Przedstawione zostaną wyniki badań procesu rozpylania surowego oleju rzepakowego, estrów metylowych oleju rzepakowego oraz oleju napędowego przy różnych ciśnieniach wtrysku i różnych przeciwcisnieniach w komorze badawczej.

3. Stanowisko badawcze. Metodyka badań

Badania procesu tworzenia strugi przeprowadzone zostały na specjalnie zbudowanym stanowisku, którego schemat przedstawia Rys. 2.



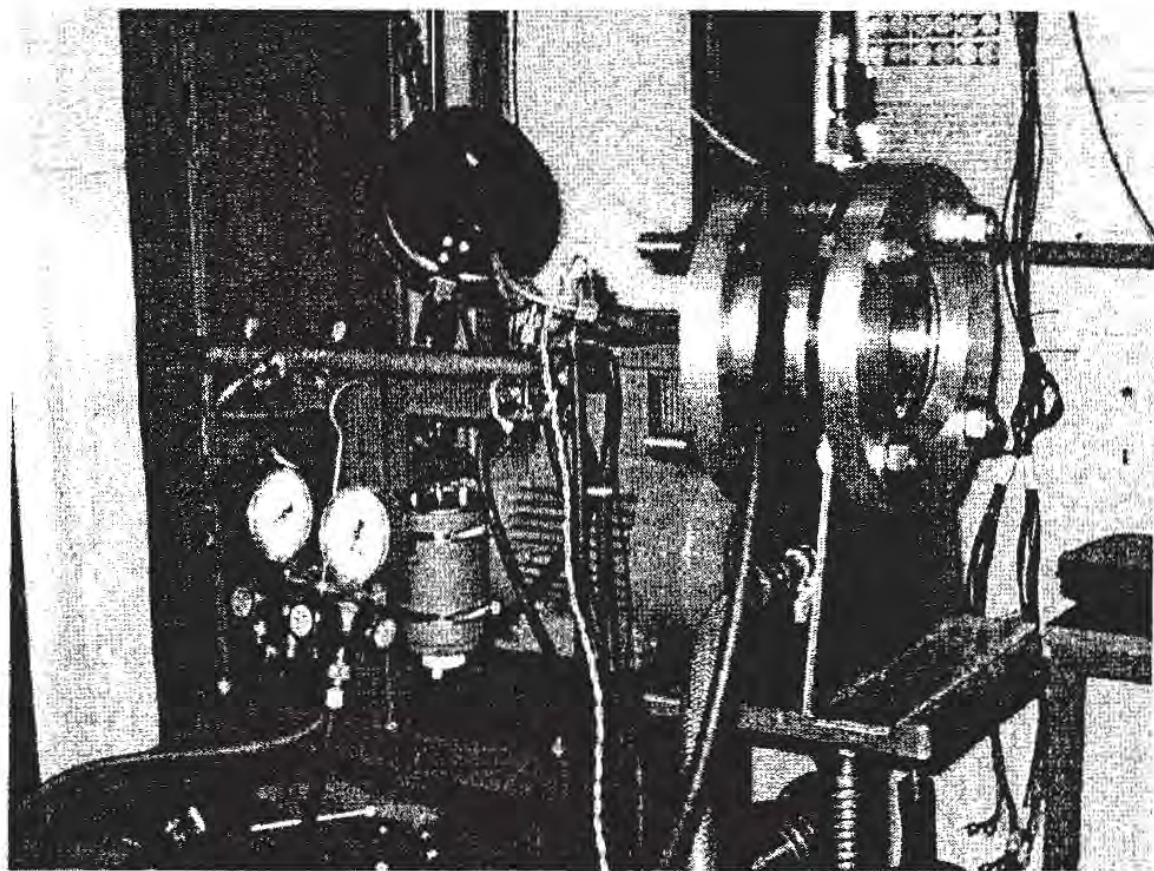
Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

1- komora wtryskowa, 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- oświetlacze, 10- manometr przeciwcisnienia w komorze, 11- kamera, 12- butla ze sprężonym powietrzem, 13- zasilacz kamery, 14- komputer do rejestracji danych, 15- monitor kontrolny.

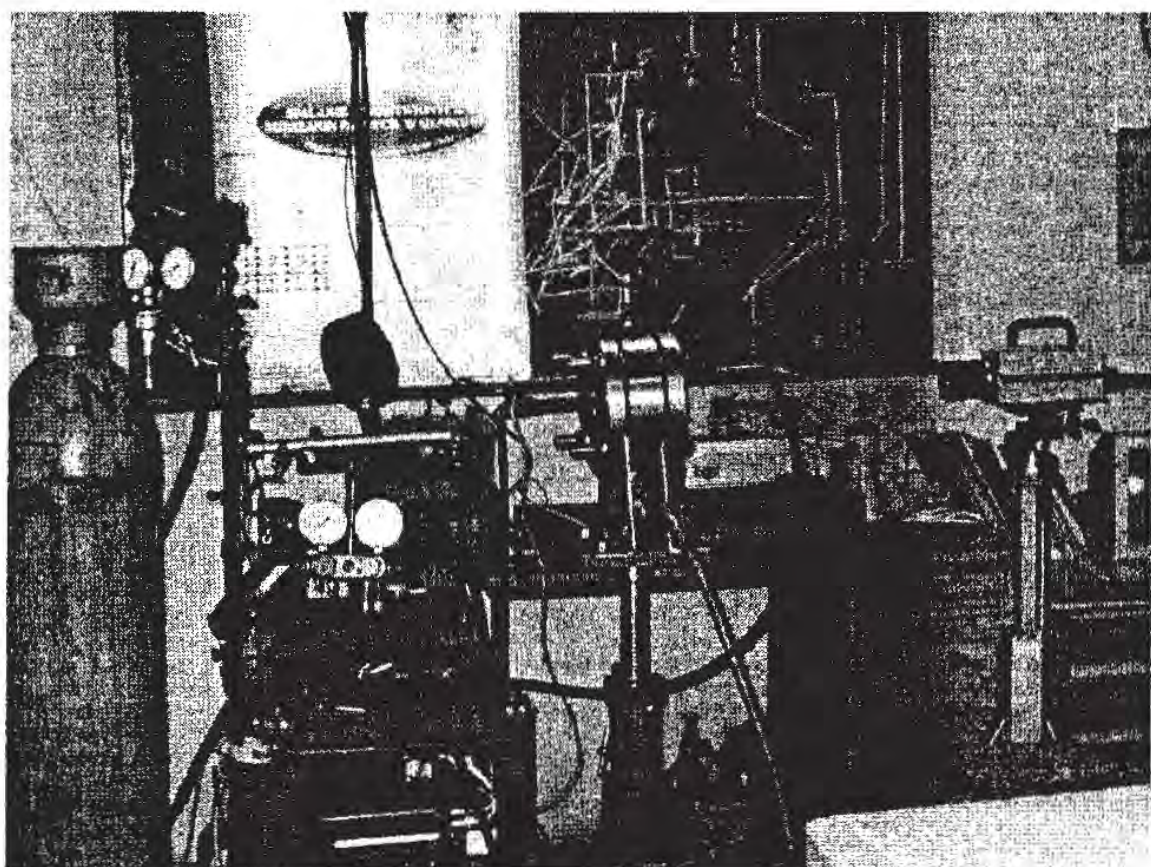
Fig. 2. Test stand scheme.

1- injection chamber, 2- injector, 3- pressure accumulator, 4- injection pump, 5- vacuum pump, 6- injection pressure controlling system, 7- injection time controlling system (module), 8- injection time programming computer (initial dose, break, main dose), 9- illuminators, 10- chamber counterpressure manometer, 11- camera, 12- compressed air bottle, 13- camera's power supply, 14- computer for data acquisition system, 15- controll monitor.

Głównym elementem stanowiska jest komora badawcza, umożliwiająca wizualizację procesu i zmianę przeciwcisnienia w komorze wtryskowej. Układ doprowadzania paliwa pozwalał na realizację wtrysku dwufazowego oraz zmianę ciśnienia wtrysku. Widok stanowiska badawczego przedstawiają Rys.3. i Rys. 4.



Rys. 3. Komora na stanowisku badawczym
Fig. 3. Chamber at the test stand



Rys. 4. Ogólny widok stanowiska badawczego
Fig. 4. General view of the test stand

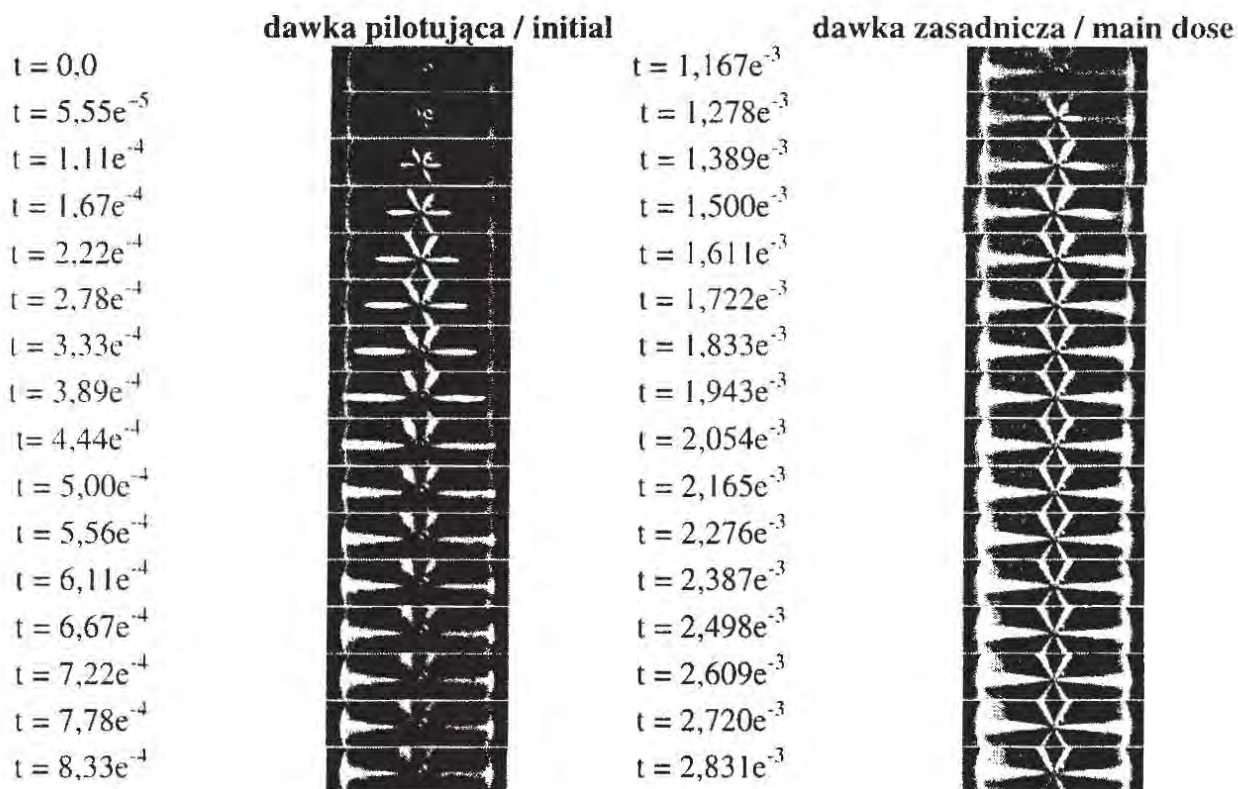
badaniach zmieniano ciśnienie wtrysku w zakresach 60, 90, 120 i 150 MPa oraz przeciwcisnienie w komorze 0,1 i 1,5 MPa. Celem badań była ocena procesu tworzenia strugi różnych paliw wtryskiwanych przy zmiennym ciśnieniu.

Do wizualizacji procesu zastosowano kamerę cyfrową PHOTRON FASTCAM ultima 40K. Zastosowana kamera umożliwia filmowanie procesu z prędkością 40500 klatek/s. Uwzględniając możliwą do odczytania drogi ostrość obrazu, wybrano prędkość filmowania równą 18000 klatek/s, czyli czas pomiędzy klatkami wynosił $55,5(5) \mu\text{s}$.

Na podstawie rejestracji filmowej przebiegu procesu określono drogę i prędkość czoła strugi w funkcji czasu oraz zasięg rozpylania i kształt strugi.

4. Wyniki badań

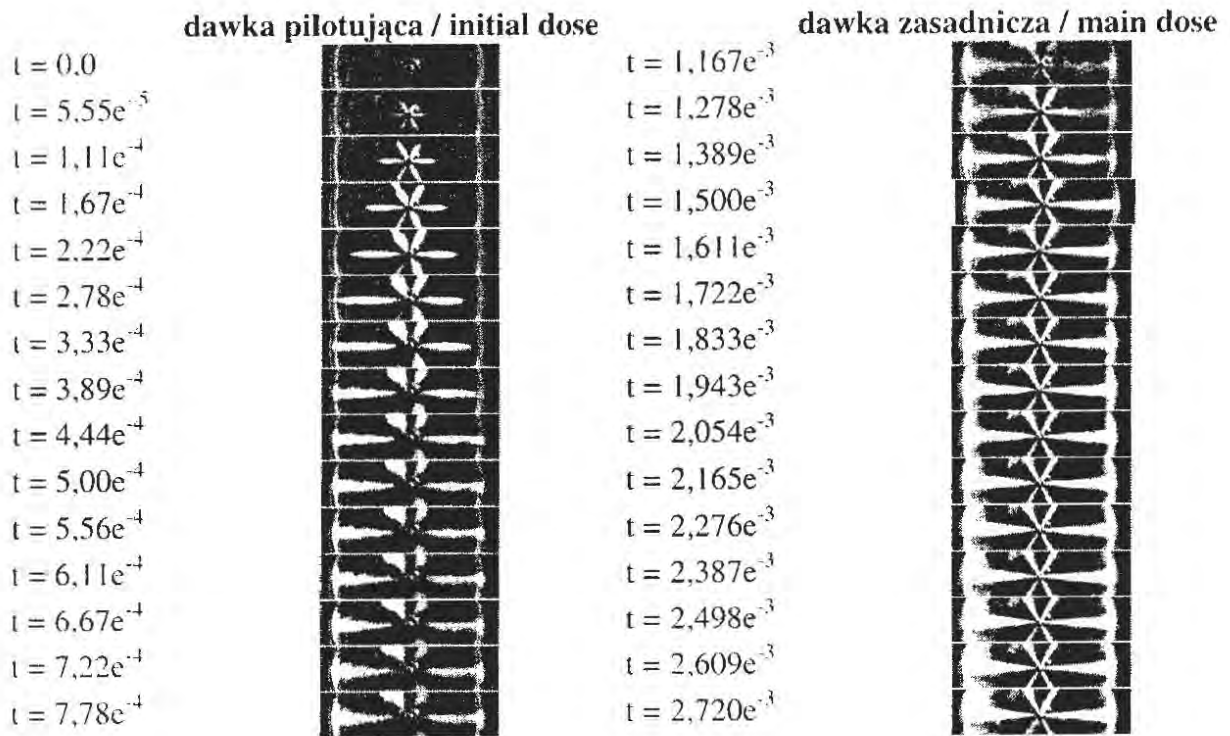
Przeprowadzono badania procesu rozpylania strugi w zależności od ciśnienia wtrysku [2] i przeciwcisnienia w komorze dla oleju napędowego, estrów metylowych oleju rzepakowego oraz oleju rzepakowego. Przykładowe wyniki badań przedstawia Rys. 5 i Rys. 6.



Rys. 5. Estry metylowe oleju rzepakowego
Fig. 5. Rape oil methyl esters

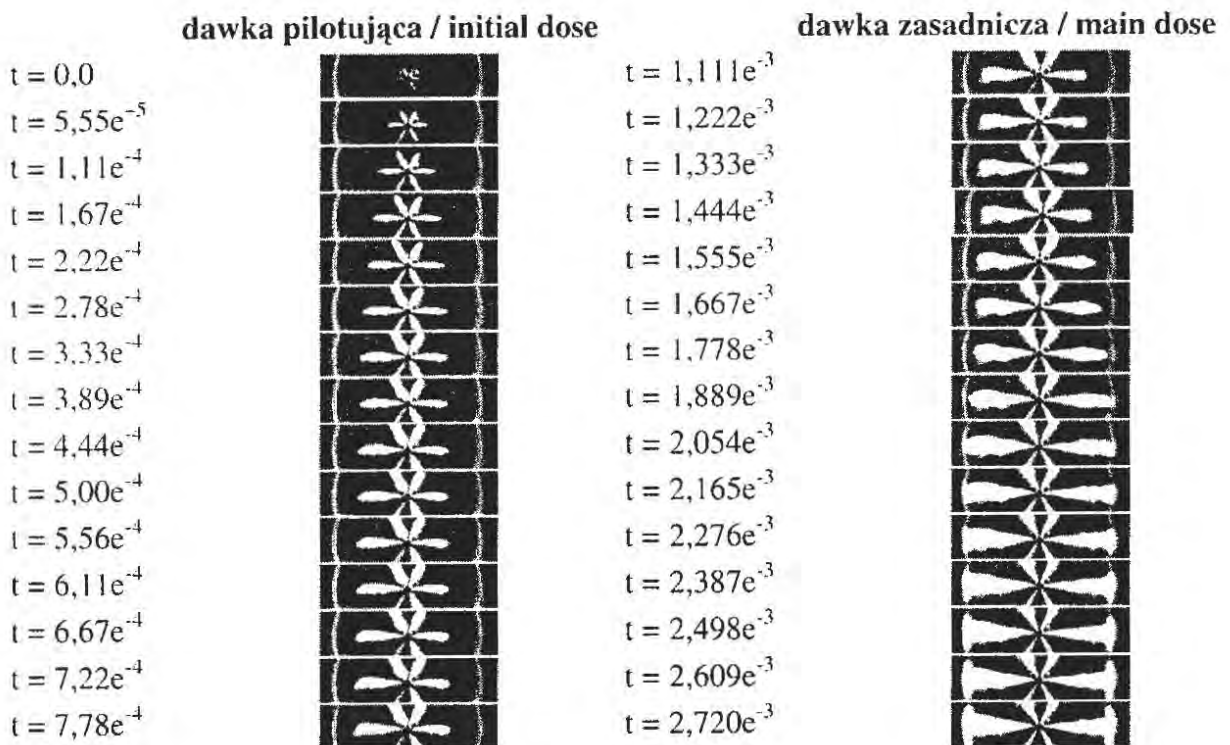
$p_1 = 0,1 \text{ MPa}$, $p_2 = 90 \text{ MPa}$,

$t_1 = 130 \mu\text{s}$, $t_2 = 1000 \mu\text{s}$, $t_3 = 1000 \mu\text{s}$.



Rys. 6. Estry metylowe oleju rzepakowego
Fig. 6. Rape oil methyl esters

$p_1 = 0.1 \text{ MPa}$, $p_2 = 120 \text{ MPa}$, $t_1 = 110 \text{ } \mu\text{s}$, $t_2 = 1000 \text{ } \mu\text{s}$, $t_3 = 1000 \text{ } \mu\text{s}$.

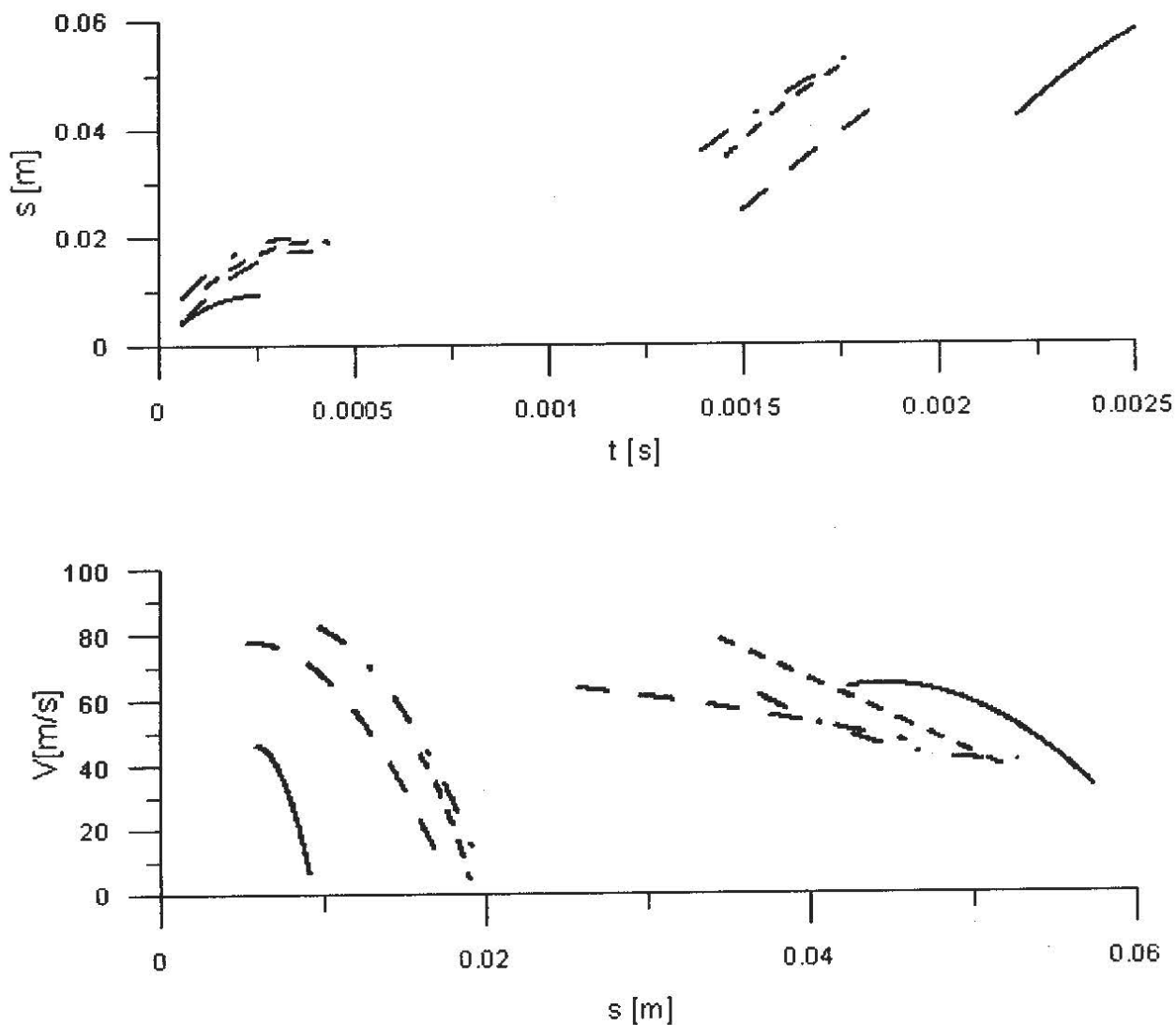


Rys. 7. Estry metylowe oleju rzepakowego
Fig. 7. Rape oil methyl esters

$p_1 = 1.5 \text{ MPa}$, $p_2 = 120 \text{ MPa}$, $t_1 = 110$, $t_2 = 1000 \text{ } \mu\text{s}$, $t_3 = 1000 \text{ } \mu\text{s}$.

Z analizy poszczególnych kadrów procesu można stwierdzić, że ze zwiększeniem ciśnienia wtrysku zmienia się kształt i zwiększa prędkość strugi. Przy wzroście przeciwcisnienia w komorze, porównując Rys. 6 i Rys. 7, obserwujemy zmianę kształtu strugi i zmniejszenie zasięgu.

Na podstawie analizy rejestracji filmowej procesów wykonano wykresy porównawcze dla różnych ciśnień wtrysku przy stałym przeciwcisnieniu w komorze równym 1,5 MPa. Z wykresów wynika, że przy centralnym usytuowaniu wtryskiwacza, ze wzrostem ciśnienia wtrysku zwiększa się prędkość strugi w funkcji promienia komory. Rys. 8. obrazuje wykres (przykładowo wybrany dla oleju napędowego) drogi w funkcji czasu i prędkości w funkcji promienia komory przy stałym przeciwcisnieniu w komorze równym 1,5 MPa i przy zmiennych ciśnieniach wtrysku równych 60, 90, 120 i 150 MPa.

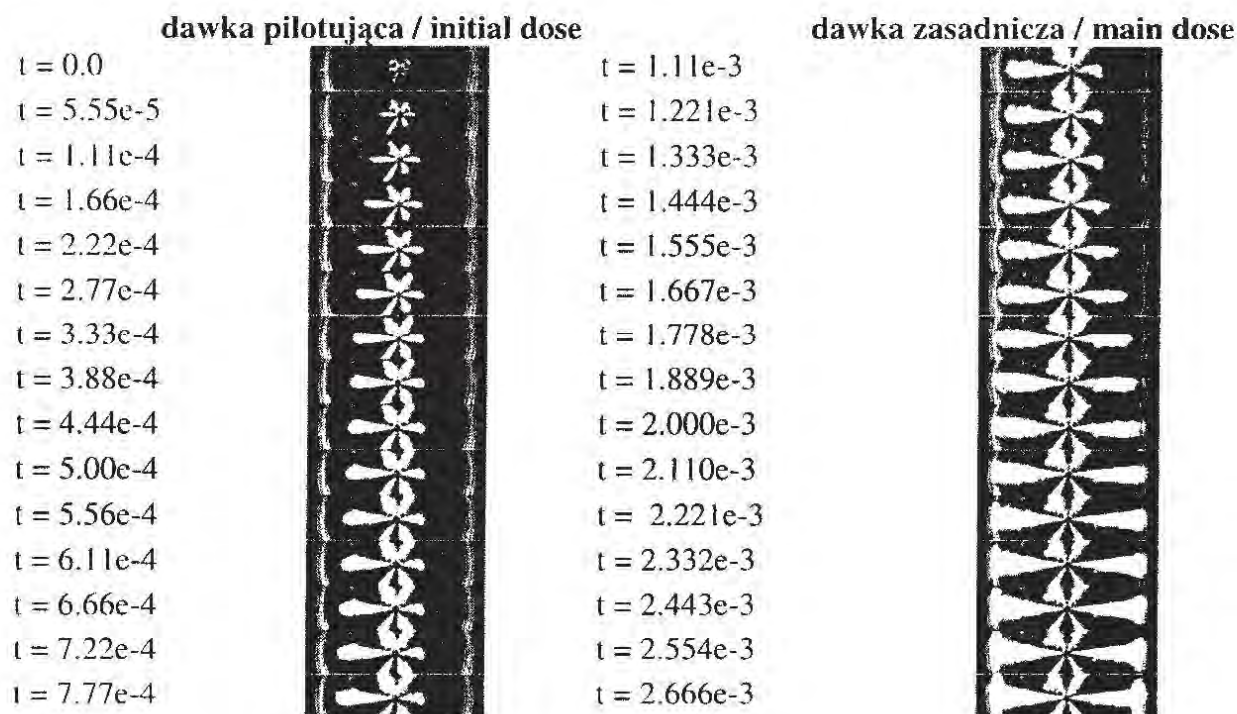


Rys. 8. Wykres funkcji $s=f(t)$ i $v=f(s)$ dla oleju napędowego

Fig. 8. Graph of the function $s=f(t)$ i $v=f(s)$ for gas oil

- | | | |
|-----------|---|---|
| ————— | - | $p_1 - 1,5 \text{ MPa}, p_2 - 60 \text{ MPa}, t_1 - 150 \mu\text{s}, t_2 - 1000 \mu\text{s}, t_3 - 1000 \mu\text{s}$ |
| - - - - - | - | $p_1 - 1,5 \text{ MPa}, p_2 - 90 \text{ MPa}, t_1 - 130 \mu\text{s}, t_2 - 1000 \mu\text{s}, t_3 - 1000 \mu\text{s}$ |
| - . - . - | - | $p_1 - 1,5 \text{ MPa}, p_2 - 120 \text{ MPa}, t_1 - 110 \mu\text{s}, t_2 - 1000 \mu\text{s}, t_3 - 1000 \mu\text{s}$ |
| - - - - - | - | $p_1 - 1,5 \text{ MPa}, p_2 - 150 \text{ MPa}, t_1 - 90 \mu\text{s}, t_2 - 1000 \mu\text{s}, t_3 - 1000 \mu\text{s}$ |

W kolejnym etapie badań porównano proces rozpylania dla różnych paliw, tzn. oleju napędowego, estrów metylowych oleju rzepakowego oraz surowego oleju rzepakowego. Na Rys. 9 przedstawiono proces rozpylania oleju napędowego w warunkach odpowiadających rozpylaniu estrów metylowych oleju rzepakowego, pokazanych na Rys. 7 (ciśnienie w komorze 1,5 MPa, ciśnienie wtrysku 120 MPa).



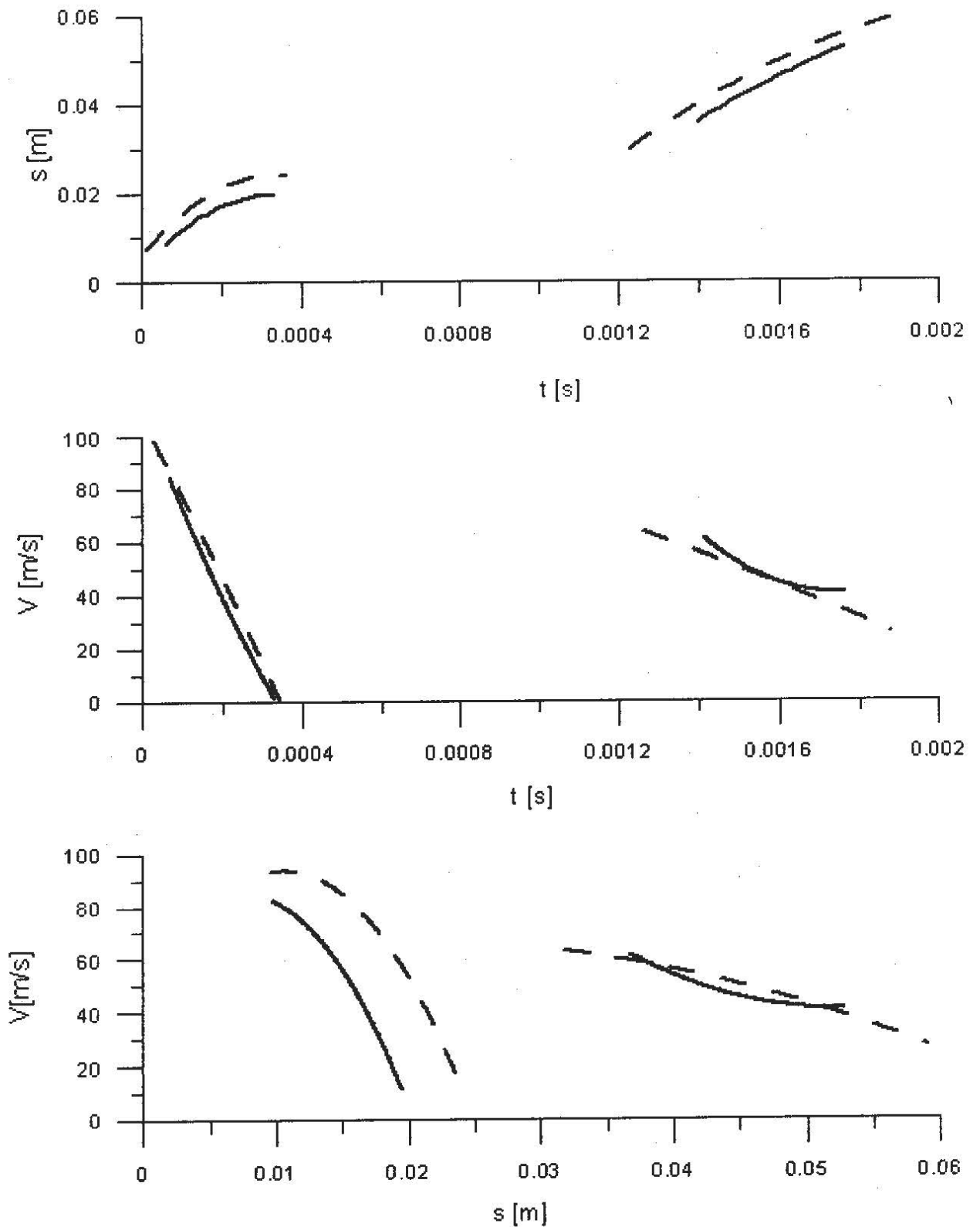
Rys. 9. Olej napędowy
Fig. 9. Gas oil

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

Z porównania tych zdjęć wynika, że w przypadku oleju napędowego mamy lepsze rozpylenie przy mniejszym zasięgu strugi, niż w przypadku estrów metylowych oleju rzepakowego.

Na Rys. 10 pokazano przykładowy wykres drogi i prędkości strugi w funkcji czasu oraz prędkości strugi w funkcji promienia komory porównując olej napędowy i estry metylowe oleju rzepakowego [3], [4].

Z analizy wykresu wynika, że zarówno dla oleju napędowego jak i estrów metylowych oleju rzepakowego, różnice w przebiegu funkcji $s=f(t)$ jak i $v=f(t)$ są niewielkie zarówno dla dawki pilotującej jak i zasadniczej. Różnica występuje natomiast w prędkości strugi dawki pilotującej w funkcji promienia komory, co można zaobserwować na początku procesu rozpylania. Różnice w lepkości paliw powodują mniejszy zasięg strugi dla oleju napędowego niż dla estrów metylowych oleju rzepakowego.



Rys. 10. Wykresy funkcji $s=f(t)$, $v=f(t)$ i $v=f(s)$ dla estrów metylowych oleju rzepakowego i oleju napędowego
 Fig. 10. Graph of the function $s=f(t)$, $v=f(t)$ and $v=f(s)$ for rape oil methyl esters and gas oil

$p_1 - 1,5 \text{ MPa}$, $p_2 - 150 \text{ Mpa}$, $t_1 - 90 \text{ } \mu\text{s}$, $t_2 - 1000 \text{ } \mu\text{s}$, $t_3 - 1000 \text{ } \mu\text{s}$.

————— Olej napędowy
 - - - - - Estry metylowe oleju rzepakowego

5. Podsumowanie

Na podstawie rejestracji filmowej procesu rozpylania strugi paliwa określono prędkość czoła strugi dawki pilotującej i dawki zasadniczej dla trzech paliw badawczych o różnej lepkości: oleju napędowego, $v = 1,8 \text{ mm}^2/\text{s}$, estrów metylowych oleju rzepakowego, $v = 4,25 \text{ mm}^2/\text{s}$ oraz surowego oleju rzepakowego, $v = 78 \text{ mm}^2/\text{s}$. W badaniach zmieniano ciśnienie wtrysku, odpowiednio 60, 90, 120 i 150 MPa. Zmieniano również przeciwcisnienie w komorze 0,1 MPa i 1,5 MPa.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono:

- wzrost lepkości paliwa powodował zwiększenie zasięgu strugi,
- ze wzrostem lepkości uległa zmniejszeniu objętość strugi paliwa,
- wzrost ciśnienia wtrysku powodował zwiększenie prędkości i zasięgu strugi,
- przy wtrysku surowego oleju rzepakowego nie można zaobserwować przerwy pomiędzy dawką pilotującą a dawką zasadniczą. Przyczyną jest prawdopodobnie zbyt wysoka lepkość surowego oleju rzepakowego.

Przeprowadzone badania pozwoliły na jakościową ocenę zmiany parametrów strugi paliwa dla oleju napędowego i estrów metylowych oleju rzepakowego, przy różnych ciśnieniach wtrysku paliwa.

Literatura

- [1] Bocheński C., *Biodiesel- paliwo rolnicze*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2003.
- [2] Bocheński C., *Zmiany procesu tworzenia strugi paliwa w silniku z ZS przy zastosowaniu wysokich ciśnień wtrysku*, Materiały Konferencyjne V Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Problemy Techniki Rolniczej i Leśnej”, Warszawa 2002
- [3] Bocheński C., *Wpływ ciśnienia wtrysku i lepkości oleju napędowego na proces rozpylania paliwa w silnikach z zapłonem samoczynnym*, IX Międzynarodowe Sympozjum im. C. Kanafojskiego „Problemy Budowy oraz Eksploatacji Maszyn Rolniczych”, Płock 2003
- [4] Jankowski A., Sęczyk J., Zbierski K., *Badania strugi paliwa rozpylanej przez układ wtryskowy Common Rail*, Materiały Konferencyjne Międzynarodowej Konferencji KONES 2000, Warszawa- Lublin 2000.