

Research-based assessment of the influence of hydrocarbon fuel atomization on the formation of self-ignition spots and the course of pre-flame processes

The paper discusses the issues of the influence of the fuel spray formation on the generation of self-ignition spots and the development of pre-flame processes in the cylinder of a model diesel engine. The investigations were carried out with the use of 8-hole piezoelectric injectors for a standard diesel fuel and three other types of fuel that were mixtures of ethanol, butanol and gasoline in a variety of proportions. By applying optical methods of analysis the authors determined the geometrical indexes of the forming of fuel spray and of fuel mass distribution in the longitudinal and transverse cross-section of the fuel spray during the injection process. The location and number of the self-ignition spots in the combustion chamber were evaluated on the basis of a comparison under the swirl vs. no swirl conditions.

Key words: diesel fuel injection, atomization, self-ignition

Badawcza ocena wpływu rozpylenia paliw węglowodorowych na tworzenie się ognisk samozapłonu oraz przebieg procesów przedpłomiennych

W artykule omówiono zagadnienia wpływu kształtowania się strugi wtryskiwanego paliwa na tworzenie ognisk samozapłonu oraz rozwój procesów przedpłomiennych w przestrzeni roboczej modelowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Badania wykonano wykorzystując 8-otwarkowe wtryskiwacze piezoelektryczne dla standardowego oleju napędowego oraz dla 3 innych paliw, które stanowiły mieszaniny: etanolu, butanolu i benzyny w różnych proporcjach. Stosując optyczne metody analizy określano wskaźniki geometryczne powstającej strugi wtryskiwanego paliwa oraz rozkład masy paliwa w przekroju podłużnym i poprzecznym strugi w trakcie trwania procesu wtrysku. Miejsce i liczbę powstających ognisk samozapłonu w przestrzeni spalania oceniano porównawczo w warunkach braku zawirowania ładunku oraz przy jego występowaniu.

Słowa kluczowe: wtrysk oleju napędowego, rozpylenie, samozapłon

1. Introduction

The need to comply with exhaust emission standards will force to search for alternative fuels to power the compression ignition engines. At the same time, expected reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere makes it desirable to apply ethanol, butanol and gasoline as additives to diesel fuel. Mixtures of these fuels have properties similar to diesel fuel, however, in some aspects surpass it. The paper contains an assessment of the applicability of such mixtures of fuels in terms of their properties for atomization, evaporation and further combustion. Already authors' earlier work focused on alternative fuels used in spark-ignition engines [5] and in compression-ignition engines [6, 7].

Analysis of literature concerning application of modern alternative fuels shows some significant aspects of this problem:

a) application of ethanol as additive to diesel fuel in the rate of 10-15% implicates lowering of PM emission by 20-27% and 30-41% respectively [1]. Such mixture has lower density, lower cetane number and smaller viscosity [2, 3]. The important barrier in application of this kind of mixtures is limited mixing ability in lower temperatures. Some research works are being currently performed for working out of new fuel additives which should allow to preserve homogeneity of the diesel fuel and ethanol mixtures independently from the temperature;

1. Wprowadzenie

Konieczność spełniania norm emisji spalin powoduje poszukiwanie paliw alternatywnych do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. Jednocześnie ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery sprawia, że w obszarze zainteresowania jest etanol, butanol oraz benzyna jako dodatki do oleju napędowego. Mieszaniny tych paliw mają własności zbliżone do oleju napędowego, jednak w niektórych aspektach je przewyższają.

W artykule dokonano oceny możliwości zastosowania takich mieszanin paliw w aspekcie właściwości ich rozpylenia oraz dalszego spalania. Wcześniejsze prace autorów dotyczyły paliw alternatywnych stosowanych w silnikach o zapłonie iskrowym [5] oraz w silnikach o zapłonie samoczynnym [6, 7].

Analiza literatury dotycząca stosowania najnowszych paliw alternatywnych wskazuje na następujące aspekty:

a) zastosowanie etanolu jako dodatku do oleju napędowego w ilości 10-15% powoduje zmniejszenie emisji PM odpowiednio o 20-27% i 30-41% [1]. Mieszanina taka wykazuje także mniejszą gęstość, mniejszą liczbę cetaonową i lepkość [2, 3]. Barię w wykorzystaniu takich mieszanin jest ograniczona skłonność do mieszania w obniżonych temperaturach. Prowadzone są obecnie badania w celu opracowania dodatków pozwalających zachować jednorodność mieszaniny oleju napędowego i etanolu niezależnie od temperatury;

- b) application of the butanol additive to diesel fuel in amount of 10% reduces the cetane number of fuel by 7% in comparison to diesel fuel [8]; small additives of nitrate of diethylohexyl (0.1%) are resulting in improvement of cetane number, which reduces self-ignition delay of the fuel. Investigation of the butanol additive (5-20%) into diesel fuel performed by Kinoshita [9] showed an increase in self-ignition delay when comparing to the diesel fuel; however the improvement in thermal efficiency of the combustion process has been confirmed.
- c) application of the diethylether (DDE) as an additive to diesel fuel allows for decreasing of self-ignition delay due to the high cetane number of DDE. Investigations performed by Biradar [10], where 5-10% DDE stand for additive to diesel fuel, have indicated an increase of maximal cylinder pressure and of maximal values of heat release rates. Experiments conducted by Iranmanesh for DDE additive up-to 10% [15] and up-to 20% [16] have showed significant decreasing of NO_x emission (up-to 51%) by higher DDE-rates. Reaching on this way of the smaller fuel viscosity leads to the improvement of fuel atomization and of combustion process course, but PM emission has not been improved simultaneously and CO emission has been recorded even higher. Similar results were obtained by Cui et al. [17] in which the application of ethanol and diesel fuel mixtures has contributed to decreasing of PM and NO_x emissions by simultaneous increasing of CO and hydrocarbons emissions. Despite the use of more volatile ethanol, the self-ignition delay increased against this of the diesel fuel, by low engine loads.

According to the examples discussed above, the share of additives in the base fuel is being usually restricted to small values. Only in cases of the ethanol application bigger shares could be taken into account.

To meet future emission limits such fuel properties are required which allow to decrease fuel density at the expense of only a small limitation of fuel calorific value. It is also required to reduce the viscosity of fuel in order to facilitate its dispersion during the injection. The use of alternative fuels (or fuel mixtures) should be capable of burning them with a large participation of recirculated exhaust gases. This requirement can be met only in the case of fuels with reduced tendency to form particulate matter, and thus more volatile. In this case it is indicated to use additives to diesel fuel in form of gasoline components (e.g., ethanol, butanol or DEE).

The use of alternative fuels (or additions) results in changes in atomization and their burning at a later stage. Research conducted by Parka [11] indicate that the high-ambient gas pressure is resulting in the fast breakup of droplets and the small droplet size. In comparison of D100 and DE20 fuels, the droplet size of DE20 fuel was smaller than that of D100 fuel due to the low kinematic viscosity and surface tension.

The evaporation of liquid droplets has very important influence on the ignition, combustion and exhaust emissions with the atomization characteristics of spray and the mixing process of air and fuel droplets [12]. Authors of the work

- b) zastosowanie butanolu w ilości 10% do oleju napędowego zmniejsza o 7% liczbę cetanową takiej mieszaniny w stosunku do oleju napędowego [8]; nieznaczne dodatki azotanu dietyloheksylu (0,1%) powodują poprawę liczby cetanowej, co zmniejsza opóźnienie samozapłonu paliwa. Badania dodatku butanolu (5-20%) do oleju napędowego prowadzone przez Kinoshitę [9] wykazały zwiększenie opóźnienia samozapłonu w stosunku do oleju napędowego, jednak jednocześnie stwierdzono polepszenie sprawności cieplnej procesu spalania;

- c) zastosowanie dietyleteru (DEE) jako dodatku do oleju napędowego pozwala na zmniejszenie opóźnienia samozapłonu ze względu na dużą wartość liczby cetanowej dietyleteru DEE. Badania prowadzone przez Biradara [10], w których DEE stanowiło 5-10% dodatku do oleju napędowego, wskazują na zwiększanie maksymalnego ciśnienia w cylindrze oraz zwiększenie maksymalnych wartości szybkości wywiązywania ciepła. Badania prowadzone przez Iranmanesha przy zawartości DEE do 10% [15] oraz do 20% [16] wykazały możliwości znacznego ograniczenia emisji NO_x (do 51%) przy dużym udziale dietyleteru. Uzyskanie mniejszej lepkości prowadzi do poprawy rozpylenia paliwa, a tym samym do poprawy procesu spalania, jednak zacinienie spalin nie zostało znacząco poprawione (a emisja CO nawet uległa zwiększeniu). Podobne rezultaty uzyskano w badaniach Cui i in. [17], w których zastosowanie mieszaniny etanolu i oleju napędowego przyczyniło się do zmniejszenia emisji sadzy oraz NO_x przy zwiększonej emisji tlenku węgla i węglowodorów w porównaniu do zasilania olejem napędowym. Mimo zastosowania bardziej lotnego etanolu, przy niewielkim obciążeniu silnika, opóźnienie samozapłonu uległo zwiększeniu w porównaniu do zasilania paliwem bazowym.

Jak wynika z przedstawionych tutaj przykładów, udział dodatków w paliwie bazowym jest ograniczony przeważnie do niewielkich ilości. Jedyne w przypadku etanolu można mówić o znacznych udziałach tego dodatku. W przypadku stosowania paliw pozwalających na spełnienie przyszłych limitów emisji spalin, wymagane są właściwości pozwalające na ograniczenie gęstości kosztem niewielkiego ograniczenia wartości opałowej. Wymagane jest także zmniejszenie lepkości paliwa w celu ułatwienia jego rozpylenia podczas wtrysku. Stosowanie paliw alternatywnych (lub mieszanin paliw) powinno pozwalać na ich spalanie z dużym udziałem recyrkulowanych spalin. Wymaganie to może być spełnione tylko w przypadku paliw o zmniejszonej skłonności do tworzenia cząstek stałych, a więc bardziej lotnych. W tym względzie celowe jest stosowanie dodatków do oleju napędowego składników benzyn (w postaci np. etanolu, butanolu lub DEE).

Zastosowanie paliw alternatywnych (lub dodatków) skutkuje zmianami w ich rozpyleniu i w późniejszym spalaniu. Badania prowadzone przez Parka [11] wskazują, że duże ciśnienie gazu skutkuje szybkim rozpadem kropel i ich małą średnicą. Porównując paliwa D100

[13] stated, that DE20 fuel started to evaporate earlier, and its final vaporized fuel mass was also larger than D100. It is the reason why the volatility of DE20 is superior to that of D100 and the active energy to evaporate in DE20 is lower than that in D100. In addition, the high-injection pressure in both fuels resulted in the fast and large evaporation due to the active atomization.

Studies of ignition delay reported in the work [14] was carried out with the use of fuels with similar cetane numbers. A mixture of ethanol and butanol with the diesel fuel has been used for this purpose, which its cetane number CN was 35 (40% ethanol or butanol 55%) and CN = 40 (30% and 40% ethanol, butanol). No significant differences in self-ignition delay have been observed at variable engine loads for the fuels with the same cetane number.

The authors' work based on previous knowledge concerning these fuels allowed for an assessment of the spray formation and atomization processes in terms of their geometrical indexes. Research on pre-flame processes were designed to determine the ability to self-ignition based on local values of indexes of the combustion process.

2. Methodology of research

2.1. Investigated fuels

Research on the fuel atomization and generation of self-ignition spots was conducted for diesel fuel and for mixtures of diesel fuel (DF) with butanol (BUT) and ethanol (E20, E100). These fuels have been marked as F1, F2, F3 and F4, and their basic indicators are shown in table 1. One can notice that for every fuels in order from F1 to F4 the calorific value is reduced by ca. 20%, their density by ca. 3.5%, and viscosity by ca. 55%. Ethanol additive to diesel fuel significantly reduces the viscosity and density of the mixture; from this reason the better and faster fuel atomization and shorten the self-ignition delay was expected in this case.

2.2. Research stands

Information on issues affecting fuel atomization and pre-flame combustion require analysis of the injection and combustion using the respective test stands. An analysis of the injection process, the formation of sprays and liquid fuel distribution in sprays was carried out using a Constant Volume Chamber (with back-pressure adjustable in a wide range of values), which is schematically shown in Figure 1.

To determine the self-ignition delay, as well as the number and locations of self-ignition spots a Rapid Compression Machine (RCM) has been exploded, which is presented in Fig. 2.

2.3. Range of research

In order to obtain the comparative results the research was carried out for three different values of injection pressure and for 3 different fuel injection duration times. During most of the measurements constant back pressure equal to 30 bar has been maintained in the workspace; in one series of measurement back pressure was increased up

oraz DE20, średnice kropeł paliwa DE20 są mniejsze niż średnice kropeł paliwa D100 z powodu małej lepkości kinematycznej i napięcia powierzchniowego. Parowanie kropeł cieczy ma bardzo istotny wpływ na zapłon, spalanie i emisję szkodliwych składników spalin wraz z charakterystyką rozpylenia oraz procesem mieszania powietrza i kropeł paliwa [12]. Autorzy pracy [13] stwierdzili, że proces parowania paliwa DE20 zaczyna się wcześniej, a całkowita masa odparowanego paliwa jest również większa niż paliwa D100. Przyczyna tego jest również większa lotność paliwa DE20 niż paliwa D100, a także mniejsza energia aktywacji parowania paliwa DE20 niż paliwa D100. Ponadto, duże ciśnienie wtrysku paliwa obu paliw skutkuje szybkim i długim parowaniem podczas rozpylenia paliw.

Badania opóźnienia samozapłonu przedstawione w pracy [14] prowadzono z wykorzystaniem paliw o podobnych liczbach cetanowych. Użyto w tym celu mieszaniny etanolu i butanolu z olejem napędowym, których liczba cetanowa wynosiła 35 (dodatek etanolu 40% lub butanolu 55%) oraz CN = 40 (dodatek 30% etanolu oraz 40% butanolu). Stwierdzono brak różnic w opóźnieniu samozapłonu przy zmiennych wartościach obciążenia dla tych paliw przy jednakowej liczbie cetanowej.

Własne badania wykorzystujące wiedzę dotyczącą tych paliw pozwoliły na ocenę procesów rozpylenia (tworzenia strugi) w aspekcie ich wskaźników geometrycznych. Badania procesów wczesnopłomiennych miały na celu określenia zdolności do samozapłonu na podstawie lokalnych wartości wskaźników procesu spalania.

2. Metodyka badań

2.1. Paliwa poddane badaniom

Badania nad rozpyleniem paliwa i powstawaniem ognisk samozapłonu przeprowadzono dla oleju napędowego oraz dla paliw stanowiących mieszaniny ON, butanolu oraz

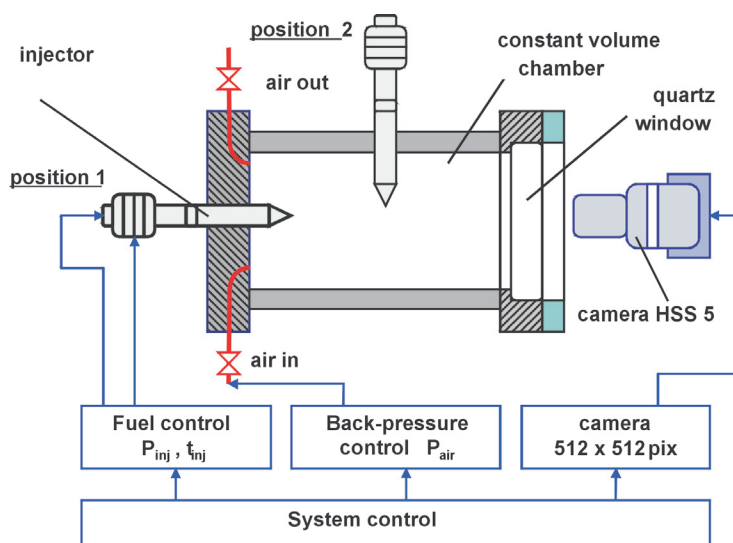
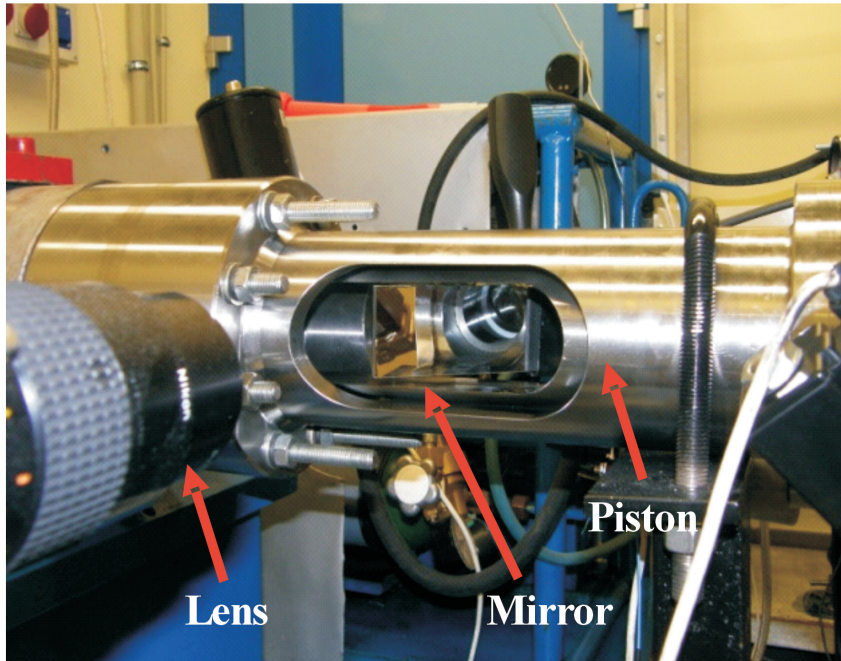


Fig. 1. The scheme of Constant Volume Chamber for investigations of fuel injection and atomization

Rys. 1. Schemat komory stałej objętości do badania rozpylenia paliwa

Table 1. Characteristics of investigated fuels
 Tablica 1. Charakterystyka zastosowanych paliw

Fuel/paliwo	F1	F2	F3	F4
Composition/skład	ON	70% ON 30% E20	45% ON 45% BUT 10% DEE	45% ON 45% E100 10% DEE
Calorific value/wartość opałowa [MJ/kg]	42.87	41.58	37.46	34.72
Density/gęstość [kg/m ³]	835	813	812	805
Viscosity/lepkość [mPa·s]	2.95	1.59	1.62	1.33
Air access ratio, λ/λ stoichiometric/ λ stoch. [-]	14.53	14.21	12.85	11.83


 Fig. 2. Optical access into combustion chamber of the Rapid Compression Machine
 Rys. 2. Dostęp optyczny do komory spalania w maszynie do pojedynczego cyklu spalania

to 40 bar. Different injection duration times and injection pressures have resulted in different values of injected fuel doses from 2.5 to 31 mg. Test plan of investigations on injection performed in the Constant Volume Chamber is presented in Table 2.

2.4. Rules of interpretation of fuel atomization research results

In the assessment of the injection process and injected fuel distribution, geometric indexes evaluated on the basis of an assessment of the amount of light reflected from the

etanolu. Paliwa te oznaczono jako F1, F2, F3 i F4, a ich podstawowe wskaźniki przedstawiono w tabelicy 1. Można zauważyć, że dla poszczególnych paliw w kolejności od F1 do F4 wartość opałowa zmniejsza się o ok. 20%, ich gęstość o ok. 3,5%, lepkość o ok. 55%. Dodatek etanolu do oleju napędowego istotnie zmniejsza więc lepkość i gęstość mieszaniny; oczekiwano więc w tym przypadku lepszego i szybszego rozpylenia paliwa oraz skrócenia zwłoki samozapłonu.

2.2. Stanowiska badawcze

Problematyka zagadnień dotyczących rozpylenia paliwa i określenia procesów przedpłomiennych wymagała analizy wtrysku i spalania z wykorzystaniem odpowiednich stanowisk badawczych. Analizę procesu wtrysku, tworzenia się strugi paliwa oraz rozkładu ciekłego paliwa w strudze prowadzono wykorzystując komorę o stałej objętości (z regulowaną w szerokich granicach wartością przeciwcisnienia), którą schematycznie przedstawiono na rys. 1.

Do oceny czasu opóźnienia samozapłonu, a także liczby i miejsc powstawania ognisk samozapłonu zastosowano tzw. Maszynę Pojedynczego Cyklu (MPC), której widok przedstawia rys. 2.

2.3. Zakres badań

W celu uzyskania wyników porównawczych badania przeprowadzono dla 3 różnych wartości ciśnienia wtrysku i dla 3 różnych czasów wtrysku paliwa. W trakcie większości

 Table 2. Test plan of investigations in the Constant Volume Chamber
 Tablica 2. Plan badań w komorze stałej objętości

P_{inj}/P_{wtr}	t_{inj}/t_{wtr}	0.3	0.5	0.7
500 bar	P_{back}	30 bar	30 bar	30 bar
	q_o	2.5 mg	9.1 mg	17 mg
800 bar	P_{back}	30 bar	30 bar	30 bar
	q_o	11.5 mg	15 mg	25 mg
1000 bar	P_{back}	30 bar/40 bar	30 bar/40 bar	30 bar/40 bar
	q_o	8 mg	18 mg	31 mg

droplets of fuel have been applied. On this basis the droplet distribution within the observation space has been identified and interpreted. The analysis includes the following indicators: fuel spray penetration and fuel spray area (its flat exposition). Spray penetration was being determined as an average of eight (the number of injector holes) fuel sprays recorded at the same time. Fuel spray area refers to the area (his flat exposition) covered by droplets glowing with reflected light of a defined level of luminance; this area was determined as a total for all sprays of injected fuel (here with 8 holes in injector).

Analysis of the distribution of fuel in cross and longitudinal planes were made for a single fuel spray in order to obtain real values, and not the average ones, Figure 3. The distance from the axis of the injector to the cross-section of spray under analysis was $72 \text{ pix} = 14.4 \text{ mm}$.

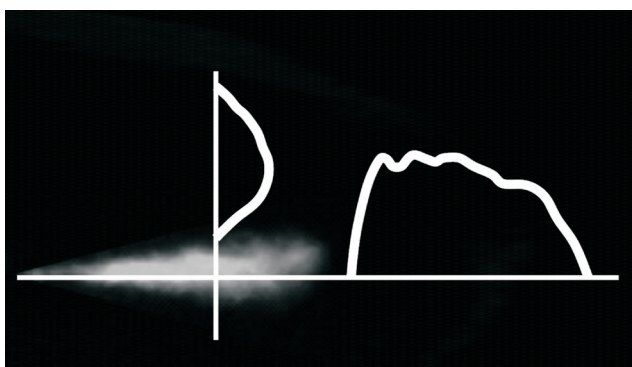


Fig. 3. Methodology of fuel distribution in cross-section and longitudinal section of fuel spray

Rys. 3. Sposób oceny rozkładu stężenia paliwa w przekroju wzdłużnym i poprzecznym strugi paliwa

3. Research on fuel atomization

3.1. Influence of injection pressure on fuel spray geometrical indexes

Investigations on fuel spray atomization were carried out in a Constant Volume Chamber. Sample pictures of sprays of different fuels in the time 0.4 ms after start of injection is shown in Fig. 4. Investigated fuels have been chosen to be characterized by different physical properties (tab. 1), which allows for an assessment of the impact of these properties to changes in fuel atomization process, and their later combustion. For comparison purposes, the medium value of spray penetration for different fuels have been determined as well as the area covered by the fuel aerosol; such a comparison is shown in Figure 5.

Due to the limited internal diameter of research chamber the maximal linear spray penetration is limited to 42 mm. This value has been reached at injection pressure of 100 MPa after time $t = 1 \text{ ms}$ from the start of injection (see e.g. Fig. 5b). In fact, spray penetration is limited by maximal linear value of engine combustion chamber and the back-pressure of the charge.

Analysis of spray penetrations at different injection pressures does not indicate the existence of significant differences

pomiarów utrzymywano stałe przeciwcisnienie w przestrzeni roboczej równe 30 bar; w jednej serii pomiarowej przeciwcisnienie zwiększono do 40 bar. Różne czasy i ciśnienia wtrysku skutkowały różnymi wielkościami wtryskiwanych dawek paliwa od ok. 2,5 do 31 mg. Plan badań wtrysku paliwa wykonanych w komorze o stałej objętości zestawiono w tablicy 2.

2.4. Zasady interpretacji wyników badań rozpylenia paliwa

W ocenie procesu wtrysku i rozprzestrzeniania się paliwa wykorzystano wskaźniki geometryczne strugi oceniane na podstawie oceny ilości światła odbitego od kropeł paliwa oraz rozkładu tak identyfikowanych kropeł paliwa w przestrzeni obserwacji. W analizie uwzględniono następujące wskaźniki geometryczne strugi paliwa: zasięg oraz pole powierzchni jej płaskiej ekspozycji.

Zasięg wyznaczano jako wartość średnią z ośmiu (liczba otworków wtryskiwacza) jednocześnie rejestrowanych strug paliwa.

Pole powierzchni odnosi się do obszaru (jego płaskiej ekspozycji) zajętego przez krople paliwa świecące światłem odbitym o zdefiniowanym poziomie luminancji; obszar ten został określony sumarycznie dla wszystkich strug wtryskiwanego paliwa (tutaj z 8 otworków wtryskiwacza).

Analizy rozkładu paliwa w przekroju poprzecznym i wzdłużnym strugi wykonano dla pojedynczej strugi paliwa, w celu uzyskania wartości rzeczywistych, a nie uśrednionych, rys. 3. Odległość analizowanego przekroju poprzecznego od osi wtryskiwacza wynosiła $72 \text{ pix} = 14,4 \text{ mm}$.

3. Badania rozpylenia paliw

3.1. Wpływ ciśnienia wtrysku paliwa na wskaźniki geometryczne strugi

Badania rozpylenia paliwa prowadzono w komorze o stałej objętości. Przykładowe obrazy strug różnych paliw w czasie 0.4 ms po rozpoczęciu wtrysku przedstawiono na rys. 4. Paliwa dobrano tak, aby charakteryzowały się różnymi cechami fizycznymi (tab. 1), co pozwala na ocenę wpływu tych cech paliw na zmiany w procesie rozpylenia i późniejszego ich spalania. W celach porównawczych wyznaczono wartości średniego zasięgu strug uzyskanych podczas wtrysku różnych paliw, a także pole powierzchni obszaru objętego przez rozpylone paliwo; porównanie takie przedstawiono na rys. 5. Ze względu na ograniczony wymiar wewnętrzny komory objętości badawczej, maksymalny wymiar liniowy zasięgu strugi ograniczony jest do 42 mm. Taką wartość uzyskano przy ciśnieniu 100 MPa po czasie $t = 1 \text{ ms}$ od początku wtrysku (por. np. rys. 5b). W rzeczywistości zasięg strugi jest ograniczony odpowiednim wymiarem liniowym przestrzeni spalania oraz występującym w niej przeciwcisnieniem.

Analiza zasięgu strug wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach wtrysku nie wskazuje na istnienie istotnych różnic w powstawaniu strug i rozpyleniu badanych paliw. Maksymalne zmiany zasięgu obserwowane są po około 1,5 ms od początku wtrysku i wynoszą około 7% (co w wartościach bezwzględnych stanowi zakres 30-40 mm) –

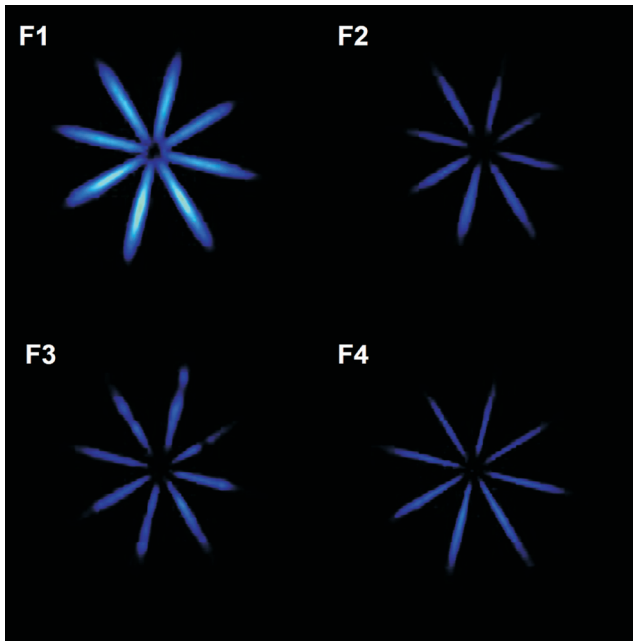


Fig. 4. Sprays formation for different fuel at injection pressure 100 MPa; injection time $t_{inj} = 0.7$ ms; time after SOI 0.4 ms

Rys. 4. Rozpylenie badanych paliw przy ciśnieniu 100 MPa; czas wtrysku $t_{wtr} = 0,7$ ms; czas od rozpoczęcia wtrysku wynosi 0,4 ms

rys. 5a. Zwiększenie wartości ciśnienia wtrysku powoduje zmniejszenie różnic w zasięgu strugi. Największe różnice uzyskuje się na początku wtrysku paliwa, jednakże wynikają one wtedy głównie z niedokładności obróbki materiału zdjęciowego, szczególnie pod względem uchwycenia chwili początku wtrysku paliwa (rys. 5b). Największy zasięg strugi wystąpił dla paliw F1 i F2, czyli paliw o największej gęstości i lepkości. Oznacza to, że paliwa zawierające największy udział oleju napędowego (a tym samym mające największą gęstość) najwolniej odparowują. Paliwa takie ulegają rozpyleniu na większe krople niż paliwa o mniejszej gęstości i lepkości. Większe krople mają większą bezwładność i szybkość poruszania się, co skutkuje ich większym zasięgiem. W przypadku zastosowań silnikowych paliwa takie będą wolniej odparowywać, co prowadzi do zwiększenia opóźnienia samozapłonu. Zjawisko to jest niekorzystne, gdyż ogranicza prędkość obrotową silnika spalinowego i pogarsza stopień wypalenia paliwa, więc także sprawność cieplną procesu.

W przypadku paliw zawierających dużą ilość paliw dodatków w postaci etanolu i butanolu (paliwa F3 i F4 zawierają tylko 45% oleju napędowego) następuje zmniejszenie zasięgu strugi paliwa. Zwiększenie części lotnych w paliwie skutkuje lepszym odparowaniem i prowadzi do skrócenia okresu opóźnienia samozapłonu. Ta właściwość

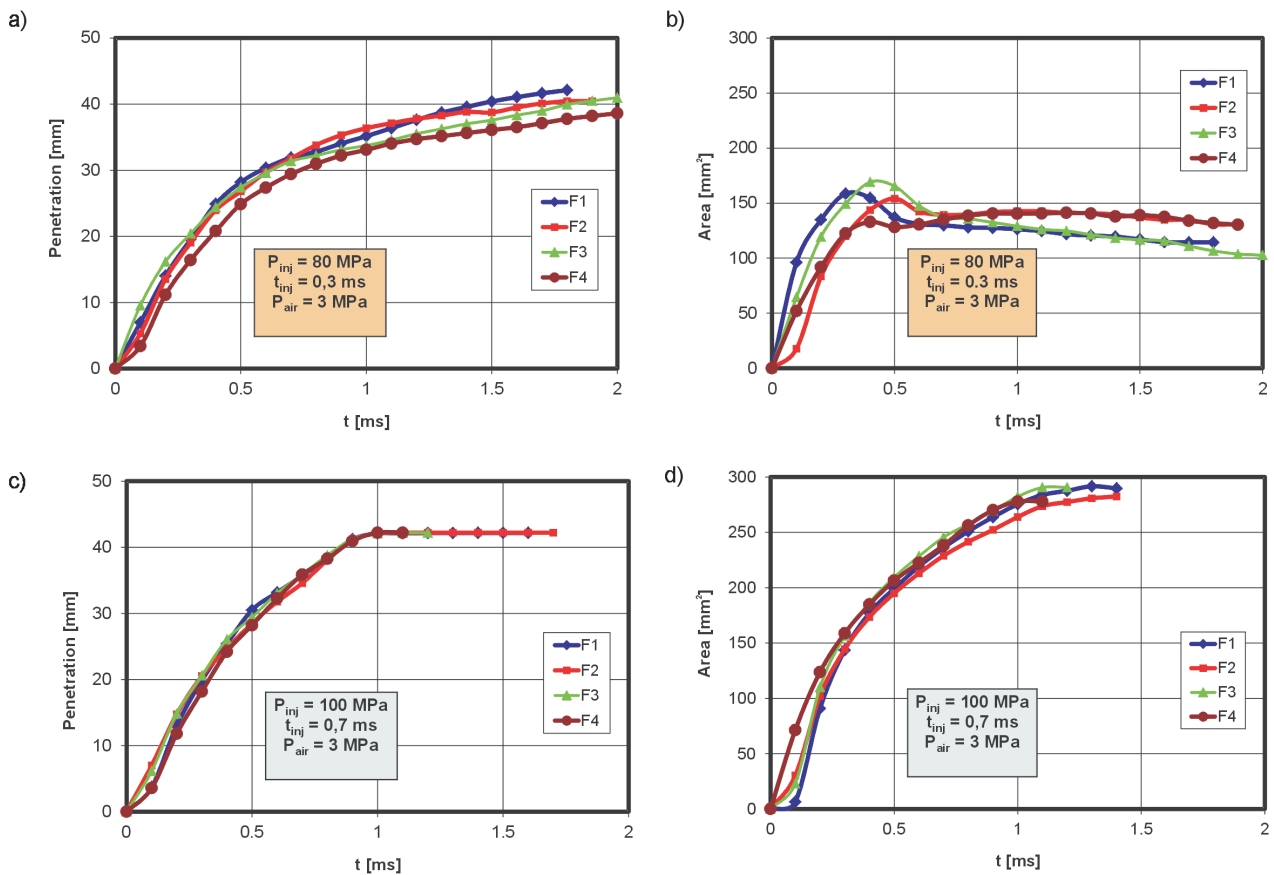


Fig. 5. Analysis of fuel spray penetration (a, b) and spray area (c, d) of sprays of injected fuels (average values from 8 sprays, by injection pressure 80 MPa, Fig. a, c, and by injection pressure 100 MPa, Fig. b, d)

Rys. 5. Analiza zasięgu (a, b) i powierzchni (c, d) strug wtryskiwanego paliwa (wartości uśrednione z ośmiu strug paliwa, przy ciśnieniu wtrysku 80 MPa, rys. a, c, oraz ciśnieniu wtrysku 100 MPa, rys. b, d)

in the formation of sprays and atomization of investigated fuels. Maximal spray penetration changes are observed after about 1.5 ms after SOI and are equal ca. 7% (what in absolute terms represents a range of 30-40 mm) – Fig. 5a. Increase of injection pressure reduces the differences in spray penetrations for tested fuels. The biggest differences are obtained at the beginning of the fuel injection, however, they are then mainly due to inaccuracies in the processing of imagery, especially in terms of capture of time of start of injection (Fig. 5b). The largest spray penetration was noticed for fuels F1 and F2, it means for fuels with the highest density and viscosity. This means that the fuel containing the largest share of diesel fuel (and hence having the highest density) evaporate more slowly. Such fuels are spraying on the larger drops than fuels with a lower density and viscosity. Larger drops have a greater inertia and speed of movement, resulting in their increased penetration. In the case of motor applications, such fuels will evaporate more slowly, which leads to increase of self-ignition delay. This is a disadvantage, because it limits the speed of combustion and engine speed; this reduces the rate of fuel burning-out and reduces thermal efficiency of the process, as well.

In the case of fuels containing a large amount of additives such as ethanol and butanol (fuels F3 and F4 contain only 45% of diesel fuel) reducing of spray penetration is being observed. Increase of volatile molecules in fuel results in better evaporation and leads to a shortening of the self-ignition delay. This property facilitates the use of such fuels when working with a large share of recirculated exhaust gases in cylinder.

Analysis of the fuel sprays area (Figure 5 c-d) allows the conclusion that with the smaller injection pressure this area is significantly smaller and stabilizes after the end of injection (about 0.6 ms, Fig. 5 c); after this time, the decreasing of the sprays area indicates the evaporation process of fuel, and with the loss of this area the speed of evaporation can be estimated. It is also noted the greater area covered by fuel aerosol for fuels with smaller density, which is easier to atomize. At the time of approximately 0.5 ms after start of injection the biggest area of sprays is reached by more volatile fuels like F3 and F4, and maximal differences of analyzed areas for all fuels achieve 10% range.

The reduction of the area covered by the drops of fuel after the injection can be applied for estimation of the fuel evaporation rate. In Figure 5c the high speed of fuel loss (evaporation) with regard to fuel F3 can be observed. In the case of larger injection pressure (here 100 MPa) a greater penetration of fuel sprays and larger areas covered by fuel spray were observed. Evaporation process of fuel could be observed in this case only after the time ca. 1.5 ms after SOI. Such studies, however, should be carried out in conditions of increased charge temperatures in the research area.

From the comparative analysis of the spray penetration and of the area of fuel atomization it could be concluded that at high injection pressure, and hence the energy of fuel sprays, the impact of the type of injected fuel is negligible. The impact of this can be clearly seen at smaller injection

ułatwia wykorzystanie takich paliw podczas pracy z dużym udziałem recyrkulowanych spalin.

Analiza powierzchni strug wtryskiwanego paliwa (rys. 5c-d) pozwala zauważyć, że przy mniejszym ciśnieniu wtrysku powierzchnia ta jest istotnie mniejsza i stabilizuje się po zakończeniu wtrysku (po ok. 0.6 ms, rys. 5c); po tym czasie zmniejszanie się powierzchni strugi wskazuje na proces parowania paliwa, a z ubytku powierzchni można oszacować prędkość parowania. Daje się także zauważyć większą powierzchnię obszaru objętego przez rozpylone paliwo dla paliw o mniejszej gęstości, czyli łatwiej ulegających rozpyleniu. W czasie około 0,5 ms od rozpoczęcia wtrysku największą powierzchnię uzyskują paliwa najbardziej lotne F3 i F4, a maksymalne różnice analizowanej powierzchni dla wszystkich paliw wynoszą 10% .

Na podstawie zmniejszania się obszaru objętego kroplami paliwa po zakończeniu wtrysku można wnioskować o szybkości parowania paliwa. Na rys. 5c można zaobserwować dużą szybkość ubytku paliwa (parowania) w odniesieniu do paliwa F3. W przypadku większego ciśnienia wtrysku (tutaj 100 MPa) obserwowano większy zasięg strug paliwa oraz większe obszary objęte rozpylonym paliwem. Proces parowania paliwa można by było w tym przypadku obserwować jedynie po czasie ok. 1.5 ms po początku wtrysku. Badania takie należałoby jednak przeprowadzić dodatkowo w warunkach zwiększonej temperatury powietrza w przestrzeni badawczej.

Z analizy porównawczej uzyskanych wyników w zakresie analizy zasięgu strugi wtryskiwanego paliwa oraz obszaru objętego efektem jego rozpylenia można uznać, że przy dużych ciśnieniach wtrysku, a więc również energii strugi wtryskiwanego paliwa, wpływ rodzaju wtryskiwanego paliwa jest nieznaczny. Wpływ taki daje się jednak wyraźnie zauważyć przy wtrysku z mniejszymi wartościami ciśnienia paliwa; wówczas paliwa (lub ich mieszaniny) o charakterze bardziej lotnym i o mniejszej gęstości sprzyjają mniejszej penetracji do wnętrza komory oraz lepszemu rozpyleniu i szybszemu parowaniu. Ta właściwość pozwala oczekiwać również lepszej skłonności do wcześniejszego samozapłonu.

Chcąc potwierdzić te spostrzeżenia podjęto dalszą analizę w celu określenia rozkładu paliwa we wtryskiwanej strudze, zarówno w jej przekroju poprzecznym, jak i w przekroju wzdłużnym, wzdłuż rdzenia strugi.

3.2. Wpływ ciśnienia wtrysku na rozkład paliwa w przekroju wzdłużnym i poprzecznym strugi paliwa

Badania geometrii strugi wtryskiwanego paliwa (zasięgu i powierzchni) poparto analizą luminancji światła odbitego od strugi w przekroju poprzecznym oraz przekroju podłużnym przyjmując, że jest ona miarą koncentracji kropeł paliwa w obserwowanym obszarze. Na rys. 6 przedstawiono porównanie takich rozkładów w przekrojach poprzecznych strug dla dwóch czasów po rozpoczęciu wtrysku: dla $t = 0,5$ ms oraz $t = 0,8$ ms. Porównanie przeprowadzono dla wszystkich badanych paliw od F1 do F4. Z porównanie tego wyniku, że po upływie czasu 0.3 ms następuje znaczne zmniejszenie luminancji dla paliw F2 i F4. Paliwa te zawierają w swoim

pressure values; the fuel (or mixtures thereof) which are more volatile and less dense foster less penetration to the interior of the chamber and applying better and faster evaporation. This property allows you to expect also better ability to self-ignition.

Confirmation of these observations needed further analysis in order to determine the distribution of fuel in sprays, both in its cross-section, and in a longitudinal section along the spray core.

3.2. Influence of injection pressure on fuel distribution along cross- and longitudinal section of the spray

Investigations of fuel spray geometry (spray penetration and spray area) have been supported by the analysis of luminance of light reflected from fuel droplets in cross and longitudinal section of sprays. It was assumed that the light luminance could stand for the measure of the fuel droplets concentration in the observed area. In Figure 6 the comparison of such distributions in cross sections of spray for two times after start of injection SOI has been presented, namely for $t = 0.5$ ms and $t = 0.8$ ms. This comparison has been evaluated for all investigated fuels: from F1 up-to F4. This comparison shows, that after the time 0.3 ms the luminance of fuel droplets is getting significantly reduced for fuels F2 and F4. These fuels contain ethanol, what significantly influences on the reduction of fuel concentration in the spray core.

Increasing the fuel injection pressure up to 100 MPa and elongation of the injection time to 0.7 ms result in similar observations (Fig. 7). F3 fuel still has the smallest spray luminance which points to the rapid growth of the volatile phase (evaporation) in the fuel.

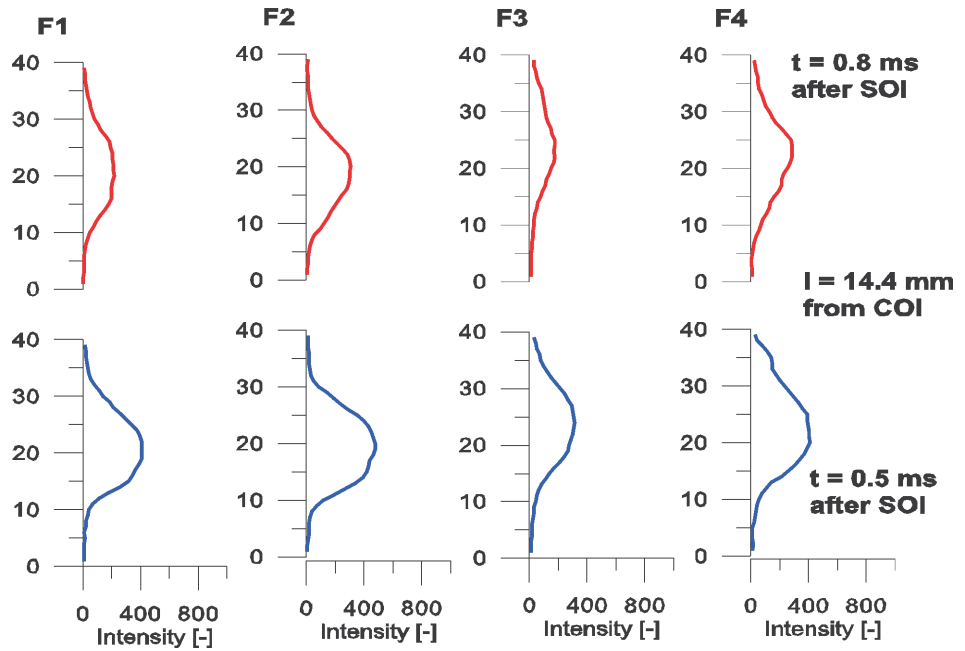


Fig. 6. Fuel concentration distribution in cross-section of the sprays of different fuels; injection pressure $P_{inj} = 80$ MPa, back-pressure 3 MPa

Rys. 6. Rozkład koncentracji paliwa w przekroju poprzecznym strug różnych paliw; ciśnienie wtrysku $P_{wtr} = 80$ MPa, przeciwcisnienie 3 MPa

składzie etanol, co wpływa na istotne zmniejszenie stężenia paliwa w rdzeniu strugi.

Zwiększenie ciśnienia paliwa do 100 MPa oraz wydłużenie czasu wtrysku do 0.7 ms skutkuje podobnymi obserwacjami (rys. 7). Nadal paliwo F3 wykazuje najmniejszą luminancję strugi co wskazuje na szybki przyrost fazy lotnej (parowanie) w tym paliwie. Natomiast zwiększenie

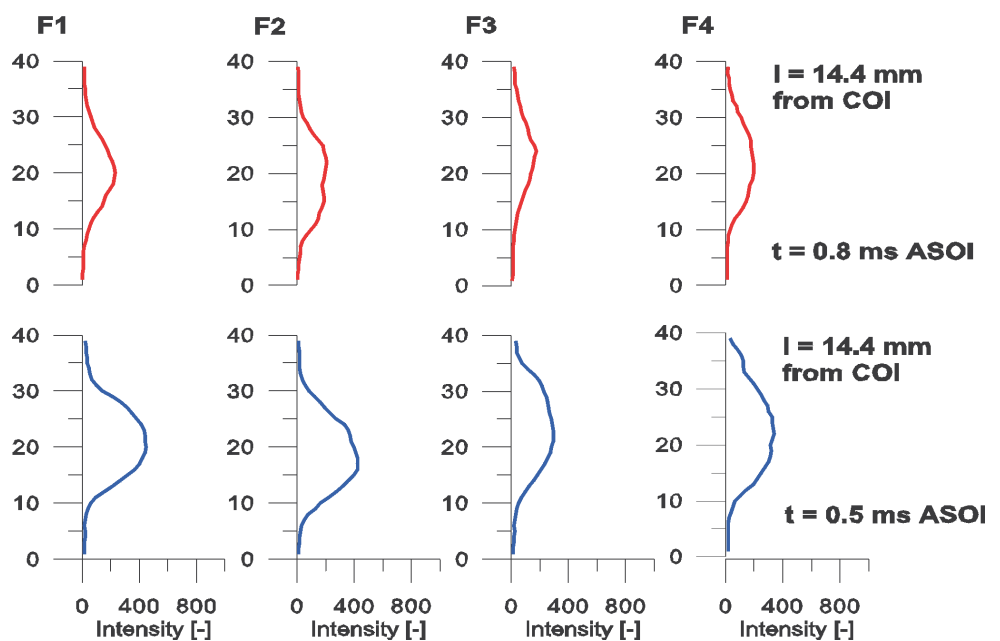


Fig. 7. Fuel concentration distribution in the cross-section of sprays of different fuels by $P_{inj} = 100$ MPa; back-pressure in the chamber 3 MPa

Rys. 7. Rozkład koncentracji paliwa w przekroju poprzecznym strug różnych paliw przy $P_{wtr} = 100$ MPa; przeciwcisnienie w komorze 3 MPa

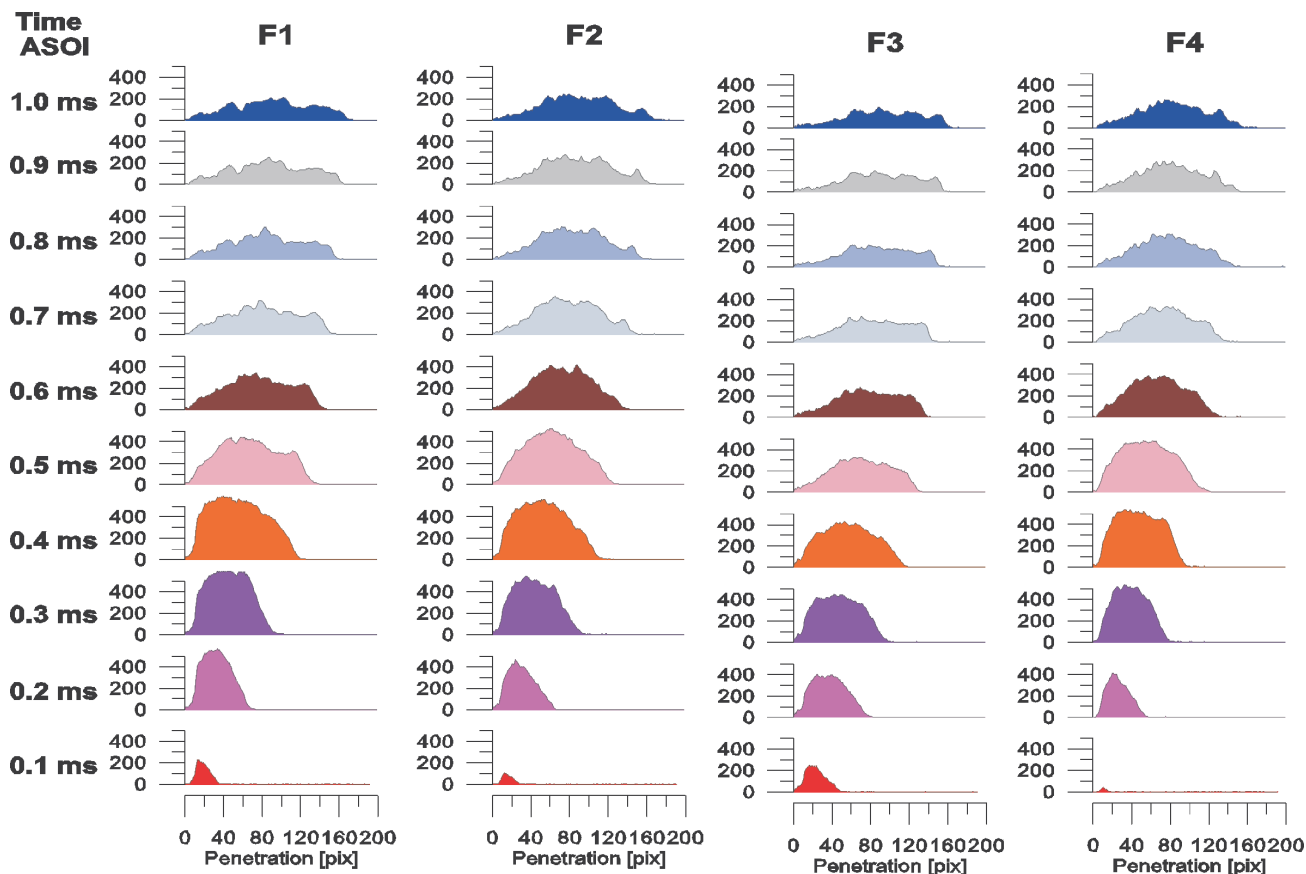


Fig. 8. Fuel mass distribution in the longitudinal section of the spray of different fuels; chamber back-pressure 3 MPa, injection pressure $P_{inj} = 80$ MPa, injection duration $t_{inj} = 0.3$ ms

Rys. 8. Rozkład koncentracji paliwa w przekroju podłużnym strug różnych paliw; wtryskiwanie do komory przy przeciwności 3 MPa w kolejnych przedziałach czasu (warunki wtrysku $P_{wtr} = 80$ MPa, $t_{wtr} = 0,3$ ms)

While increasing the injection time increases the fuel quantity dispensed by the injector. A large mass of fuel causes that the fuel distribution in fuel sprays after 0.5 and 0.8 ms after start of injection does not bring substantial changes. Increased fuel dose causes that after the time 0.8 ms the fuel concentration in spray is increased, reflecting the delayed evaporation.

Analysis of fuel distribution in cross section of spray of fuel F3 (Fig. 6 and 7) shows a significantly lower its concentration (a mixture of diesel fuel, butanol and DEE) regardless of the time of observation. Despite the fact that the density of this fuel ($\rho = 805$ kg/m³) differs a little from fuel density of fuel F2 ($\rho = 813$ kg/m³), the distribution of fuel in the cross-section of spray indicates greater volatility, resulting in a lower luminance of fuel drops in this section.

It should be noted that this fuel has in its composition 45% of butanol. Previous observations have been also confirmed by the analysis of longitudinal sections. It is apparent from it that the fuel F3 indicates the smallest fuel concentration in this section which is indicated by low luminance value (Fig. 8). This phenomenon is observed particularly intensively during the atomization process for $t > 0.5$ ms.

Increasing the fuel injection pressure up to 100 MPa and elongation of the injection duration up-to $t_{inj} = 0,7$ ms results in similar changes. F3 fuel shows the smallest luminance val-

czasu wtrysku powoduje zwiększenie ilości wypływającego paliwa z wtryskiwacza. Duża masa paliwa powoduje, że analiza rozkładu paliwa w strudze po 0.5 oraz po 0.8 ms od rozpoczęcia wtrysku nie przynosi istotnych zmian. Zwiększona dawka paliwa powoduje, że po czasie 0.8 ms koncentracja paliwa w strudze jest zwiększona, co świadczy o opóźnionym parowaniu.

Analiza rozkładu paliwa w przekroju poprzecznym strugi wtryskiwanego paliwa F3 (rys. 6 i 7) wskazuje na znacznie mniejszą jego koncentrację (mieszanina ON, butanolu oraz DEE) niezależnie od czasu obserwacji. Mimo, że gęstość tego paliwa ($\rho = 805$ kg/m³) niewiele różni się od gęstości paliwa F2 ($\rho = 813$ kg/m³), rozkład paliwa w przekroju strugi wskazuje na większą lotność, co skutkuje mniejszą luminancją przekroju kropelek paliwa. Należy zauważyć, że paliwo to zawiera w swoim składzie 45% butanolu. Poprzednie spostrzeżenia potwierdza również analiza przekroju wzdłużnego. Wynika z niego, że paliwo F3 wykazuje najmniejszą koncentrację w tym przekroju o czym świadczy niewielka wartość luminancji (rys. 8). Zjawisko to jest obserwowane szczególnie intensywnie w czasie rozpylenia dla $t > 0,5$ ms.

Zwiększenie ciśnienia wtrysku paliwa do 100 MPa i wydłużenie czasu wtrysku do $t_{wtr} = 0,7$ ms skutkuje podobnymi zmianami. Paliwo F3 wykazuje najmniejsze wartości lumi-

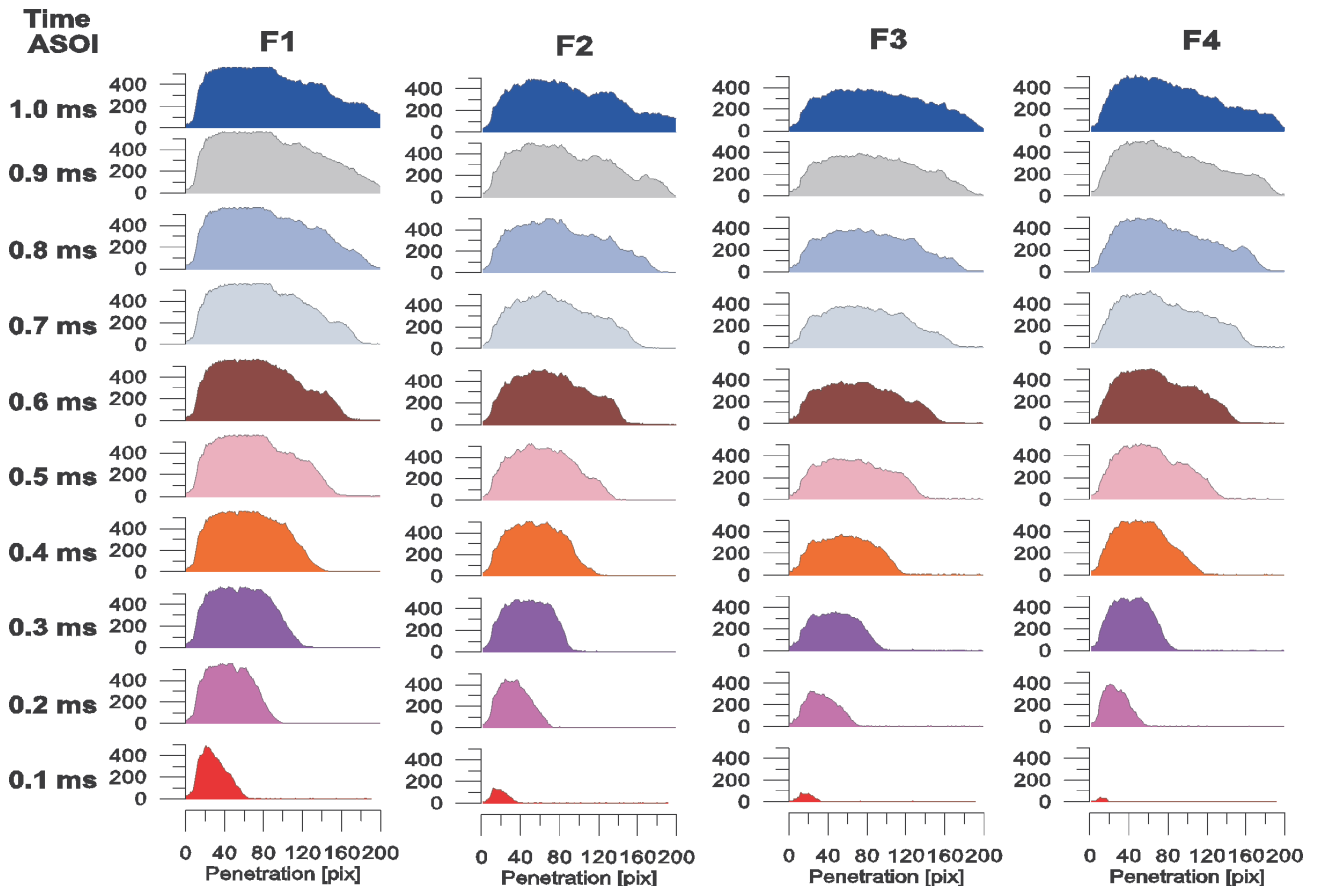


Fig. 9. Fuel mass distribution in the longitudinal section of the spray of different fuels; chamber back-pressure 3 MPa, injection pressure $P_{inj} = 100$ MPa, injection duration $t_{inj} = 0.7$ ms

Rys. 9. Rozkład koncentracji paliwa w przekroju podłużnym strug różnych paliw; wtryskiwanie do komory z przeciwnościem 3 MPa w kolejnych przedziałach czasu (warunki wtrysku $P_{wtr} = 100$ MPa, $t_{wtr} = 0,7$ ms)

ues (Fig. 9), which proves greatly its evaporation. However, the decrease in luminance is definitely smaller than with the smaller injection pressure 80 MPa.

Differentiated atomization of these fuels causes that there are also expected the differences in their flammability and pre-flame processes course. To determine such differences the research of self-ignition delay was carried out in a Rapid Compression Machine. The results of these tests are shown below.

4. Determination of self-ignition ability of tested fuels

Self-ignition delay of hot flames was defined in the following way: this is the time counted from the moment in which in the image appears fuel at the tip of the injection nozzle, until the moment in which in the image appears the first outbreak of a hot flame, which ensures a further continuous development. This method of self-ignition delay determination is saddled with a mistake arising from the half of the interval time between following images; by the application of filming frequency by 60 000 FPS this time amounts $< 8.3 \mu\text{s}$.

An example of a sequence of images for the assessment of self-ignition delay of hot flames is shown in Fig. 10.

A research on the phenomenon of the self-ignition and

nancji (rys. 9), co świadczy o znacznym jego odparowaniu. Jednak spadek luminancji jest zdecydowanie mniejszy, niż przy mniejszym ciśnieniu wtrysku 80 MPa.

Zróżnicowane rozpylenie tych paliw powoduje, że spodziewane są również różnice w ich zapalności i przebiegu procesów przedpłomiennych. W tym celu przeprowadzono badania samozapłonu paliw w Maszynie Pojedynczego Cyklu. Wyniki tych badań przedstawiono poniżej.

4. Ocena skłonności badanych paliw do samozapłonu

Określenie czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni zdefiniowano w sposób następujący: jest to czas liczony od chwili, w której na zdjęciu pojawia się wtrysk na końcówce rozpylacza, aż do chwili, w której na zdjęciu pojawiają się pierwsze ogniska gorącego płomienia, które gwarantują dalszy ciągły jego rozwój. Ten sposób określania opóźnienia samozapłonu obarczony jest błędem wynikającym z połowy czasu odstępu pomiędzy kolejnymi zdjęciami; przy zastosowanej częstotliwości filmowania 60 000 FPS czas ten wynosi $< 8.3 \mu\text{s}$.

Przykład sekwencji zdjęć dla oceny czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni przedstawiono na rys. 10.

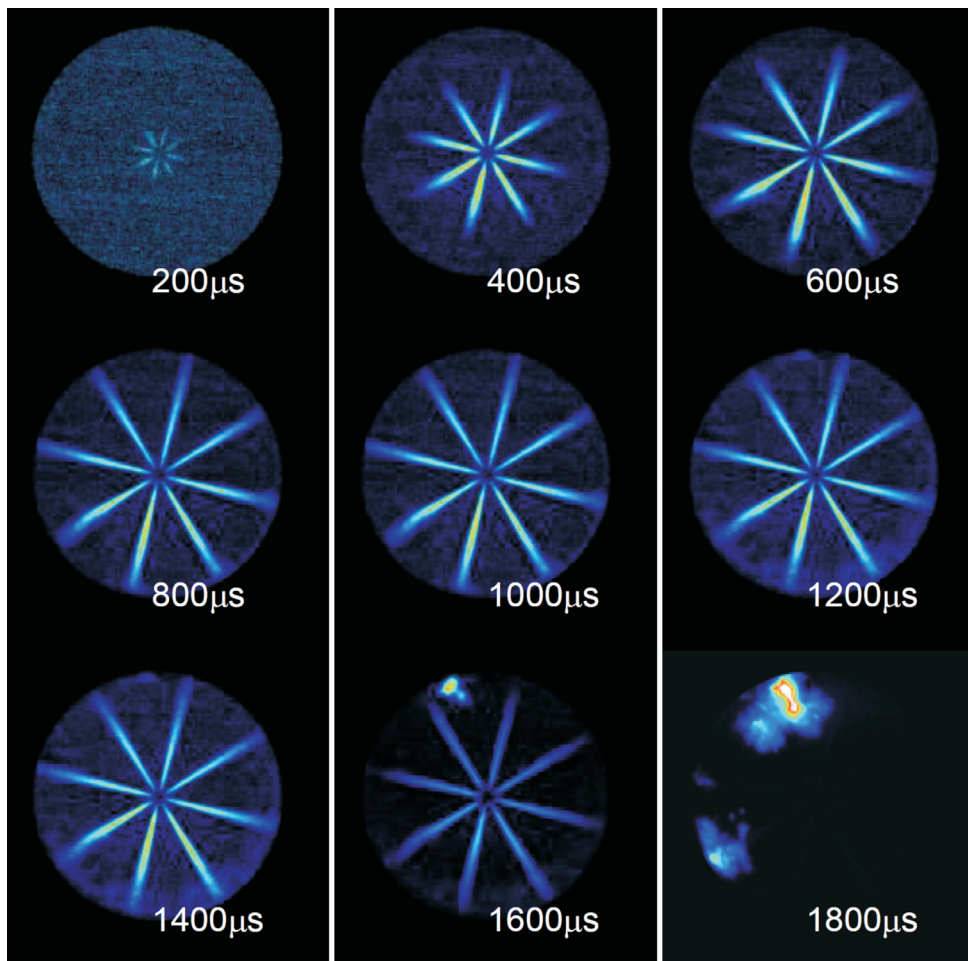


Fig. 10. Sequence of images showing the method of determining of the self-ignition delay of hot flames ($P_{inj} = 100 \text{ MPa}$, $t_{inj} = 0.5 \text{ ms}$, fuel F4)

Rys. 10. Sekwencja zdjęć obrazująca sposób określenia czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni ($P_{wtr} = 100 \text{ MPa}$, $t_{wtr} = 0,5 \text{ ms}$) – fuel F4

combustion process was carried out by adjusting injection duration to equal the energy contained in fuel (for different fuels with different calorific values). Because of this the dose of fuel at a pressure of 50 MPa has been reduced to approximately 16.6 mg, and at a pressure of 100 MPa to 9.3 mg. These values correspond to the equivalent energy of diesel fuel. It was found that the injected fuel dose will have energy equal to $Q = 713 \text{ J}$.

In Figure 11 there are presented two following images: the first one for the inception of the first self-ignition spots, subsequent to depict the further development of these spots into regular flame.

The comparison was made for a single dose of fuel injected, for two cases of fuel injection pressure $P_{inj} = 50 \text{ MPa}$ (images on the left side) and 100 MPa (right side), for which the time of self-ignition of hot flames (t_{soc} – time of start of combustion) has been determined and then referred to the time of the start of injection ($t_{soi} = 0.0$). This value is specified as self-ignition delay of individual fuels.

From the images presented in Fig. 11 it could be concluded, that the short self-ignition delay occurs for injection of F2 and F4 fuels, regardless of injection pressure and size

Badania zjawiska samozapłonu i procesu spalania prowadzono dostosowując czas wtrysku do jednakowej energii zawartej w dawce paliwa (dla różnych paliw). Z tego względu ograniczono wielkość dawki paliwa przy ciśnieniu 50 MPa do około 16,6 mg, a przy ciśnieniu 100 MPa do wartości 9,3 mg. Wartości te odpowiadają ekwiwalentowi energetycznemu olejowi napędowemu. Ustalono, że wtryskiwana dawka będzie miała energię równą $Q = 713 \text{ J}$.

Na rysunku 11 przedstawiono obok siebie dwa kolejne zdjęcia: pierwsze dla chwili powstania pierwszych ognisk samozapłonu, następnie kolejne dla zobrazowania dalszego rozwoju tych ognisk. Porównanie przeprowadzono dla pojedynczej dawki wtryskiwanego paliwa, dla dwóch przypadków ciśnienia wtrysku paliwa $P_{wtr} = 50 \text{ MPa}$ (obrazy z lewej strony) oraz 100 MPa (obrazy z prawej strony), dla którego wyznaczono czas pojawienia się samozapłonu gorących płomieni (oznaczenie t_{soc} – time of start of combustion) odnosząc go do chwili początku wtrysku ($t_{soi} = 0,0$). Wielkość tę określono jako czas opóźnienia samozapłonu poszczególnych paliw.

Z przedstawionych na rys. 11 obrazów wynika, że najmniejsze opóźnienie samozapłonu występuje podczas wtrysku paliwa F2 oraz F4, niezależnie od wielkości ciśnienia i dawki. W przypadku tych paliw, zwiększenie ciśnienia wtryskiwanego paliwa i mniejsza dawka powodują skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu o 0,2 ms. Mniejsze ciśnienia paliwa powodują, że paliwo F3 uzyskuje największe wartości opóźnienia samozapłonu oraz najmniejszą dynamikę rozwoju płomienia.

Podobne warunki zaobserwowano przy zwiększeniu ciśnienia paliwa. Wynika z tego, że duża zawartość paliw benzynowych znacznie zmniejsza stężenie paliwa w strudze, jednak nie pozwala na skrócenie opóźnienia samozapłonu paliwa. Własności te wynikają z przeciwnych właściwości paliw cechujących się odmiennymi liczbami: cetanową oraz oktanową.

Warunki łatwej zapalności paliwa F2 potwierdzają badania wcześniejsze (rys. 6), w których uzyskano mniejszą

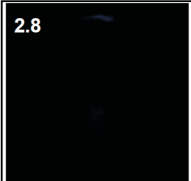
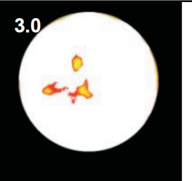

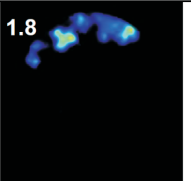
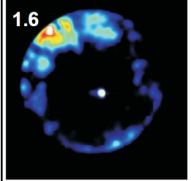
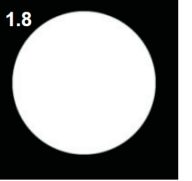

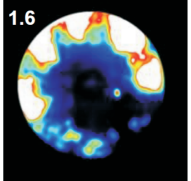
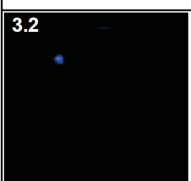
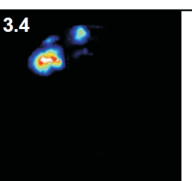
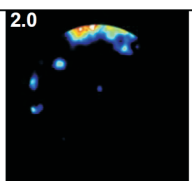
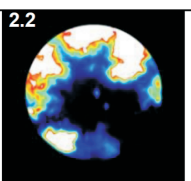

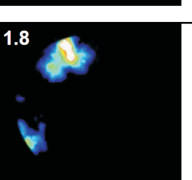
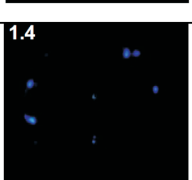
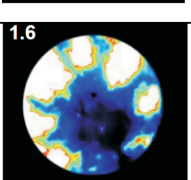
		F1 – Q = 713 J P _{inj} = 50 MPa t-SOC = 2.8 ms Very high dynamics of flame propagation.			F1 – Q = 713 J P _{inj} = 100 MPa t-SOC = 1.4 ms Flame penetrate with reduced speed.
		F2 – Q = 713 J P _{inj} = 50 MPa t-SOC = 1.6 ms Big number of self-ignition spots. High dynamics of flame propagation.			F2 – Q = 713 J P _{inj} = 100 MPa t-SOC = 1.4 ms In the beginning phase the flame area is getting reduced.
		F3 – Q = 713 J P _{inj} = 50 MPa t-SOC = 3.2 ms First self-ignition spots of small area, Slow flame propagation.			F3 – Q = 713 J P _{inj} = 100 MPa t-SOC = 2.0 ms Higher dynamics of flame penetration.
		F4 – Q = 713 J t-SOC = 1.6 ms Slow flame propagation, flame covers whole chamber after long time (2.0 ms).			F4 – Q = 713 J t-SOC = 1.4 ms Flame covers whole chamber after long time 1.8 ms from SOC.

Fig. 11. Images of self-ignition spots and early flame propagation for hydrocarbon fuels for variety of injection pressures and fuel doses

Rys. 11. Obrazy samozapłonu paliw węglowodorowych wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach paliwa dla różnych dawek

of fuel dose. In the case of these fuels, a higher injection pressure and a smaller fuel dose result in shortening of self-ignition delay for 0.2 ms. Lower fuel pressures are causing for fuel F3 the greatest delay values and the smallest flame development dynamics.

Similar conditions were observed by increasing the fuel pressure. It follows that the high content of petrol significantly reduces the concentration of fuel in sprays, however, does not allow for shortening of self-ignition delay. These properties arise from the opposite properties of fuels characterized by cetane or octane numbers.

Easy flammability conditions confirm earlier tests of fuel F2 (Fig. 6), which resulted in

powierzchnię strugi rozpylanego paliwa. Jednak analiza przekroju poprzecznego i wzdłużnego nie wskazuje jednoznacznie na mniejsze stężenie paliwa w rdzeniu strugi (rys. 7 i 8). Pozwala to na stwierdzenie, że mieszanina oleju napędowego z etanolem jest paliwem pozwalającym na uzyskiwanie

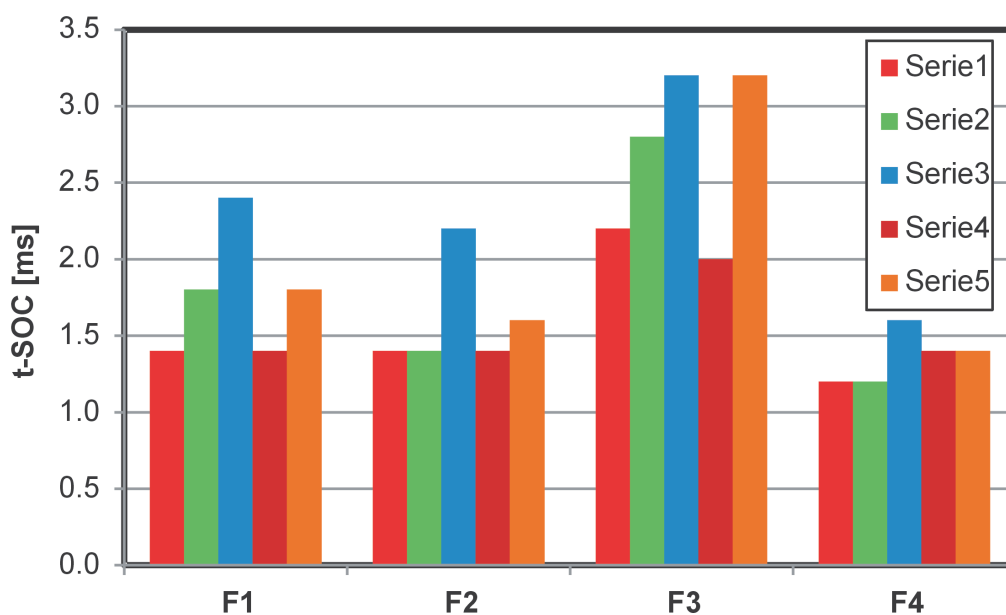


Fig. 12. Values of self-ignition delay for investigated fuels in 5 series of measurements

Rys. 12. Wartości opóźnienia samozapłonu dla kolejnych prób badawczych

a smaller area of fuel sprays. However, the cross-sectional and longitudinal analysis of sprays does not indicate clearly to the smaller fuel concentration in the core planes (Fig. 7 and 8). This allows to declare that a mixture of diesel fuel with ethanol is the fuel with small self-ignition delay values. It makes possible to get bigger engine speeds because of shorter duration of combustion. Quick evaporation of ethanol will be conducive to a small particulates and hydrocarbons emissions. Similar conclusions are to be drawn from the fuel properties of the F4. Much larger amount of ethanol (45%) results in reducing of self-ignition delay. However, participation in the fuel of 30% DEE does not impact significantly on the reduction of self-ignition delay in relation to fuel F2. Analysis of images from Fig. 11 allows to declare that self-ignition spots occur when fuel sprays are still visible. In the case of fuel F2 ignition delay time is the same (1.6 ms) but the fuel in sprays had already evaporate (no lighting of sprays by appearing of light-emitting flame).

Research on the self-ignition of fuels were conducted with five replications. The values obtained in subsequent attempts were correlated with the average values (Fig. 12). It was a certain uniqueness results of self-ignition delays that may result from the limited repeatability of charge movement in chamber, which significantly affects the rate of formation of self-ignition spots. However, the overall picture has been confirmed: fuel F4 has the greatest propensity to combust, better than fuel F2 and F1 fuel (diesel).

Summary

The research reported here show the applicability of alternative fuels in combustion systems of compression ignition (CI) engines. These fuels are characterized by various physical and chemical properties, which leads to different conditions of fuel atomization and combustion. In particular, it should be noted that:

- mean values of fuel atomization indicators do not indicate clearly on the existence of significant differences in their values; this note mainly applies to fuel spray penetration at different injection pressures and injected doses;
- for smaller values of the injection pressure the differences in spray penetration are increasing for some fuels; about 0.8 ms after start of the injection fuel containing ethanol has a much larger surface area of sprays than the other fuels;
- evaluation of fuel distribution in sprays indicates that fuels with ethanol have a greater rate of evaporation;
- fuel containing ethanol are shortening the self-ignition delay, faster evaporation of fuel, and as a consequence the reduction of emissions of toxic compounds is being expected.

Acknowledgments

The research presented in this paper was performed within the European Research Project PowerFul FP7, grant agreement No.234032, POWERtrain for Future Light-duty vehicles. The authors are grateful to EU for funding the work and to all persons, who have their contribution in this study and laboratory works.

niewielkich wartości opóźnienia samozapłonu. Umożliwia to uzyskanie dużej wartości prędkości obrotowej podczas spalania (krótki czas trwania spalania). Szybkie odparowanie etanolu będzie sprzyjało niewielkiej emisji cząstek stałych oraz węglowodorów. Podobne wnioski należy wyciągnąć z własności paliwa F4. Znacznie większa ilość etanolu (45%) powoduje, że uzyskuje się zmniejszenie opóźnienia samozapłonu. Jednakże udział w paliwie 30% DEE nie wpływa w znaczącym stopniu na skrócenie opóźnienia samozapłonu w stosunku do paliwa F2. Analiza obrazów z rys. 11 pozwala na stwierdzenie, że ogniska samozapłonu pojawiają się, gdy widoczne są jeszcze strugi paliwa. W przypadku paliwa F2 czas opóźnienia samozapłonu jest ten sam (1,6 ms) jednak strugi paliwa zdążyły już odparować (brak oświetlenia strug przez pojawiający się płomień).

Badania samozapłonu paliw przeprowadzono z pięciokrotnym powtórzeniem. Wartości uzyskane w kolejnych próbach zestawiono z wartościami średnimi (rys. 12). Stwierdzono pewną niepewność uzyskanych wyników opóźnienia samozapłonu, które mogą wynikać z ograniczonej powtarzalności ruchu ładunku w przestrzeni spalania, który istotnie wpływa na szybkość tworzenia się ognisk samozapłonu. Jednak ogólny obraz uległ potwierdzeniu: paliwo F4 wykazuje największą skłonność do samozapłonu, lepszą od paliwa F2 oraz od paliwa F1 (oleju napędowego).

Podsumowanie

Przedstawione badania wskazują na możliwości zastosowania paliw alternatywnych w systemach spalania silników o zapłonie samoczynnym. Paliwa te charakteryzują się innymi właściwościami fizykochemicznymi, co prowadzi do odmiennych warunków rozpylenia paliwa i spalania. W szczególności należy stwierdzić, że:

- średnie wartości wskaźników rozpylenia paliwa nie wskazują jednoznacznie na występowanie różnic w przebiegu tych wskaźników; uwaga ta dotyczy głównie zasięgu strugi paliwa przy zróżnicowanych ciśnieniach i dawkach wtrysku;
- przy mniejszych wartościach ciśnienia wtrysku różnice w rozwoju strugi zwiększają się dla różnych paliw; paliwo zawierające etanol ma znacznie większą powierzchnię strugi niż pozostałe paliwa po około 0,8 ms od rozpoczęcia wtrysku;
- ocena rozkładu paliwa w strudze wskazuje, że paliwa z dodatkiem etanolu charakteryzują się większą szybkością parowania;
- paliwa zawierające etanol wykazują skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu, szybsze odparowanie paliwa, a w konsekwencji tego należy się spodziewać zmniejszenia emisji składników szkodliwych spalin.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

DEE	Diethylether/ <i>dietyleter</i>
$P_{air/back}$	Air back-pressure/ <i>przeciwcisnienie powietrza</i>
P_{inj}	Fuel injection pressure/ <i>ciśnienie wtrysku paliwa</i>

Bibliography/Literatura

- [1] Shi X., Yu Y., He H., Shuai S., Wang J., Li R.: Emission characteristics using methyl soyate-ethanol-diesel fuel blends on a diesel engine. *Fuel* 2005, 84, 1543-1549.
- [2] Satge' de Caro P., Mouloungui Z., Vaitilingom G., Berge J.C.: Interest of combining an additive with diesel-ethanol blends for use in diesel engines. *Fuel* 2001, 80, 565-574.
- [3] Hansen A.C., Zhang Q., Lyne P.W.L.: Ethanol-diesel fuel blends – A review. *Biores. Technol.* 2005, 96, 277-285.
- [4] He B.Q., Shuai S.J., Wang J.X., He H.: The effect of ethanol blended diesel fuels on emissions from a diesel engine. *Atmos. Environ.* 2003, 37, 4965-4971.
- [5] Pielecha I., Maslennikov D., Wislocki K.: Optical Research of Spray Development of E85 Fuel in High Pressure Gasoline Direct Injection System, SAE Technical Paper 2010-01-2285, 2010.
- [6] Wislocki K., Pielecha I., Maslennikov D., Czajka J.: Analysis of Bio-Diesel Spray Atomization in Common-Rail Piezoinjector System, SAE Technical Paper 2010-01-2282, 2010.
- [7] Pielecha I., Wislocki K., Czajka J., Maslennikov D.: Determination of the self-ignition delay for different types of diesel fuels. W2P014, 34th International Symposium on Combustion, Warszawa 2012.
- [8] Wadumesthrige K., Ng K., Salley S.: Properties of Butanol-Biodiesel-ULSD Ternary Mixtures, SAE Int. J. Fuels Lubr. 3(2):660-670, 2010.
- [9] Kinoshita E., Hamasaki K., Imabayashi R.: Diesel Combustion Characteristics of Bio-diesel with 1-Butanol, SAE Int. J. Fuels Lubr. 5(1):558-565, 2012.
- [10] Biradar C., Subramanian K., Dastidar M.: Performance Improvement and Emissions Reduction of a DI Diesel Engine for use of Karanja Biodiesel-Diesel Blend (B20) Using Diethyl Ether, SAE Technical Paper 2011-26-0004, 2011.
- [11] Park S.H., Cha J., Kim H.J., Lee C.S., Effect of early injection strategy on spray atomization and emission reduction characteristics in bioethanol blended diesel fueled engine. *Energy* 39 (2012) 375–387, doi: 10.1016/j.energy.2011.12.050.
- [12] Baumgarten C. Mixture formation in internal combustion engines. New York: Springer; 2006.
- [13] Park S.H., Suh H.K., Lee C.S., Nozzle flow and atomization characteristics of ethanol blended biodiesel fuel. *Renewable Energy* 35 (2010) 144–150, doi: 10.1016/j.renene.2009.06.012.
- [14] Yamamoto, S., Watanabe, S., Komada, K., Sakaguchi, D. et al., Study on Combustion and Soot Emission of Ethanol or Butanol Blended with Gas Oil in a Direct Injection Diesel Engine, SAE Int. J. Fuels Lubr. 6(3):2013, doi:10.4271/2013-32-9112
- [15] Iranmanesh, M., Subrahmanyam, J., and Babu, M., Potential of Diethyl ether as supplementary fuel to improve combustion and emission characteristics of diesel engines, SAE Technical Paper 2008-28-0044, 2008, doi:10.4271/2008-28-0044.
- [16] Iranmanesh, M., Subrahmanyam, J., and Babu, M., Potential of Diethyl Ether as a Blended Supplementary Oxygenated Fuel with Biodiesel to Improve Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engines, SAE Technical Paper 2008-01-1805, 2008, doi:10.4271/2008-01-1805.
- [17] Cui, X., Helmantel, A., Golovichev, V., and Denbratt, I., Combustion and Emissions in a Light-Duty Diesel Engine Using Diesel-Water Emulsion and Diesel-Ethanol Blends, SAE Technical Paper 2009-01-2695, 2009, doi:10.4271/2009-01-2695.

Ireneusz Pielecha, DSc., DEng. – doctor at the Faculty of Machines and Transport of Poznan University of Technology.

Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: ireneusz.pielecha@put.poznan.pl



Jakub Czajka, DEng. – doctor at the Faculty of Machines and Transport of Poznan University of Technology.

Dr inż. Jakub Czajka – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: jakub.czajka@put.poznan.pl



Prof. Krzysztof Wislocki, DSc, DEng. – Professor at the Faculty of Machines and Transport of Poznan University of Technology.

Prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztof Wislocki – Profesor nzw. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: krzysztof.wislocki@put.poznan.pl



Przemysław Borowski, MEng. – postgraduate at the Faculty of Machines and Transport of Poznan University of Technology.

Mgr inż. Przemysław Borowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

e-mail: przemyslaw.t.borowski@doctorate.put.poznan.pl

