

Ireneusz PIELECHA  
Jakub CZAJKA  
Przemysław BOROWSKI  
Krzysztof WISŁOCKI

PTNSS–2013–SC–069

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

*Abstract: The paper discusses the issues of the influence of the fuel spray formation on the formation of self-ignition spots and the development of pre-flame processes inside a model diesel engine. The investigations were carried out with 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 fuel spray and the 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.*

Keywords: diesel fuel injection, atomization, self-ignition

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

*Streszczenie: 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-otwinkowe 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. 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 często 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 fakty:

a) zastosowanie etanolu jako dodatku do oleju napędowego w ilości 10-15% powoduje ograniczenie emisji PM odpowiednio o 20-27% i 30-41% [1]. Mieszanina taka powoduje zmniejszenie gęstości, liczby cetanowej i lepkości [2, 3]. Barię w wykorzystaniu takich mieszanin jest ograniczona skłonność do mieszania w niższych temperaturach. Prowadzone są obecnie badania w celu opracowania dodatków pozwalających zachować jednorodność mieszaniny tych paliw;

b) zastosowanie butanolu w ilości 10 % do oleju napędowego pogarsza o 7 % liczbę cetanową takiej mieszaniny [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] wskazują na zwiększenie opóźnienia samozapłonu w stosunku do oleju napędowego, jednak jednocześnie stwierdzono polepszenie sprawności cieplnej procesu spalania;

c) zastosowanie dietyleru (DEE) jako dodatku do oleju napędowego pozwala na ograniczenie opóźnienie samozapłonu ze względu na dużą wartość liczby cetanowej 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.

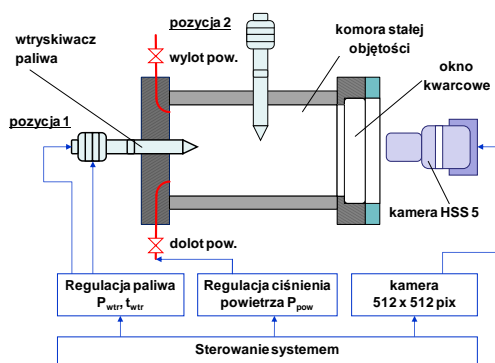
Autorskie badania wykorzystujące wiedzę dotyczącą tych paliw pozwoliły na ocenę procesów rozpylenia (tworzenia strugi) w aspekcie ich wskaźników geometrycznych. Badania procesów wczesnopłomiennych miały na celu określenia zdolności do samozapłonu na podstawie lokalnych wartości wskaźników procesu spalania.

## 2. Metodyka badań

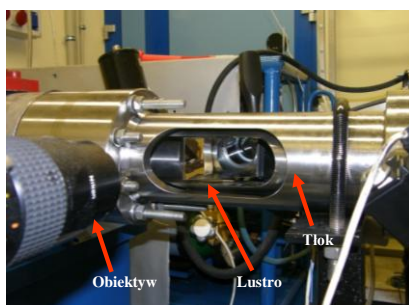
Problematyka zagadnień dotyczących rozpylenia paliwa i określenia procesów przedpłomiennych wymagała analizy wtrysku i spalania z wykorzystaniem obiektów badawczych, które stanowią:

- komora o stałej objętości (o dowolnej ustalonej wartości ciśnienia) do badania wtrysku i rozpylenia paliwa ciekłego (rys. 1),
- maszyny do przeprowadzenia pojedynczego cyklu spalania (MPC) po wtrysku paliwa i jego obserwacji za pomocą metod optycznych (rys. 2).

W badaniach zastosowano paliwa stanowiące mieszaniny ON, butanolu oraz etanolu. Ich podstawowe charakterystyki przedstawiono w tabelicy 1.



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



Rys. 2. Dostęp optyczny do komory spalania w maszynie do pojedynczego cyklu spalania

Tablica 1. Charakterystyka zastosowanych paliw

| Paliwo                       | F1    | F2                  | F3                           | F4                            |
|------------------------------|-------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Skład                        | ON    | 70 % ON<br>30 % E20 | 45% ON<br>45% BUT<br>10% DEE | 45% ON<br>45% E100<br>10% DEE |
| Wart. opałowa [MJ/kg]        | 42,87 | 41,58               | 37,46                        | 34,72                         |
| Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ] | 0,835 | 0,813               | 0,812                        | 0,805                         |
| Lepkość [mPa·s]              | 2,95  | 1,59                | 1,62                         | 1,33                          |
| $\lambda_{stech.}$ [-]       | 14,53 | 14,21               | 12,85                        | 11,83                         |

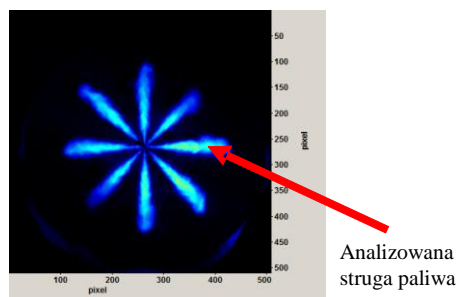
Tablica 2. Plan badań w komorze stałej objętości (podano przeciwnie i masę paliwa)

| $P_{wtr}/t_{wtr}$ | 0,3               | 0,5               | 0,7               |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 500               | 30 bar            | 30 bar            | 30 bar            |
|                   | 2,5 mg            | 9,1 mg            | 17 mg             |
| 800               | 30 bar            | 30 bar            | 30 bar            |
|                   | 11,5 mg           | 15 mg             | 25 mg             |
| 1000              | 30 bar/<br>40 bar | 30 bar<br>/40 bar | 30 bar<br>/40 bar |
|                   | 8 mg              | 18 mg             | 31 mg             |

## 3. Metodyka obróbki obrazów

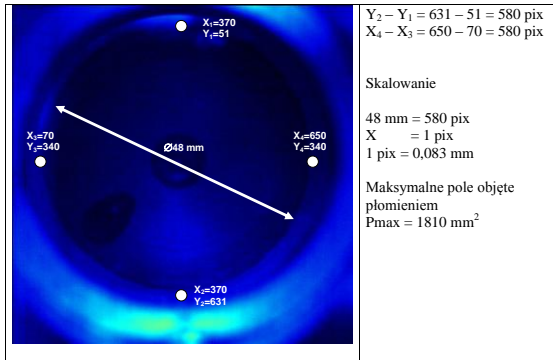
### 3.1. Analiza geometrii strugi paliwa

Analiza wskaźników geometrycznych strugi paliwa dotyczyła: zasięgu strugi paliwa oraz pola powierzchni. Zasięg wyznaczono jako wartość średnią z ośmiu strug. Pole powierzchni dotyczy wszystkich strug paliwa. Jednak przekroje poprzeczne i wzdłużne wykonano dla pojedynczej strugi paliwa (w celu uzyskania rzeczywistych wartości, a nie uśrednionych – rys. 3). Odległość analizowanego przekroju poprzecznego od osi wtryskiwacza wynosiła 72 pix = 14,4 mm.



Rys. 3. Przykładowe rozwinięcie strugi paliwa z wtryskiwacza 8-otworkowego

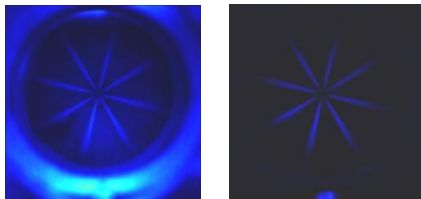
Na podstawie znajomości geometrii komory stałej objętości i odwzorowaniu wielkości obrazu określono wymiary liniowe zasięgu strugi paliwa i jej powierzchni – rys. 4.



Rys. 4. Charakterystyczne punkty komory stałej objętości umożliwiające określenie liniowych wymiarów geometrii strugi paliwa

### 3.2. Analiza samozapłonu

Materiał zdjęciowy z badań rozpylenia i spalania paliw w MPC poddano cyfrowej obróbce obrazu w celu uzyskania informacji o wartościach opóźnienia samozapłonu. Od zarejestrowanych zdjęć procesu odjęto zdjęcie samej komory spalania. Uzyskano obraz strugi wtryskiwanego paliwa bez zarysu komory (rys. 5).

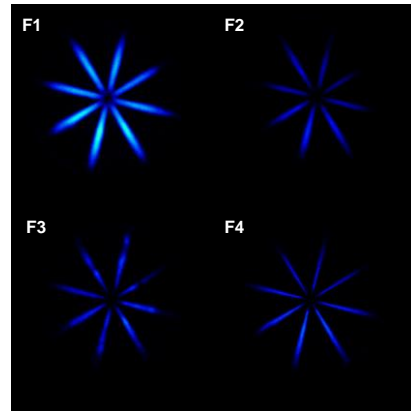


Rys. 5. Sposób obróbki obrazów uzyskanych w Maszynie do Pojedynczego Cyklu spalania

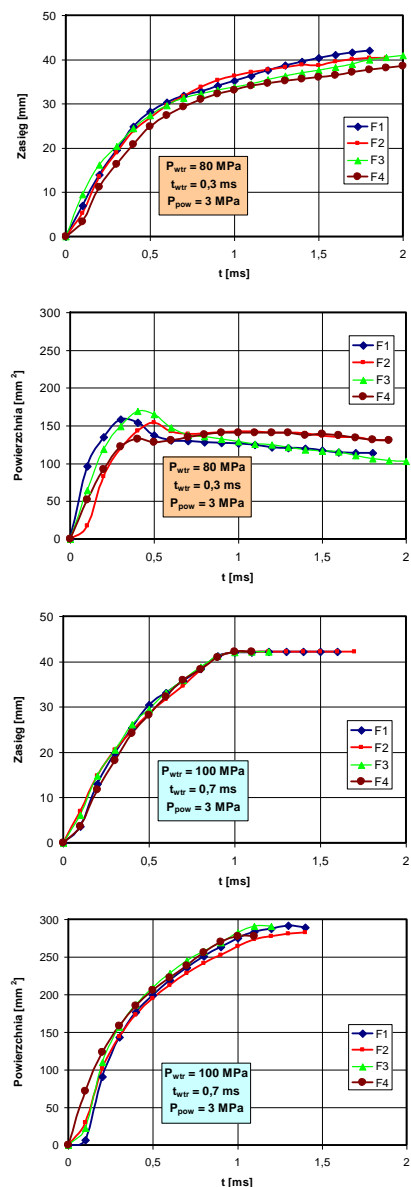
## 4. Badania rozpylenia

Badania rozpylenia paliwa prowadzono w komorze o stałej objętości. Przykładowe jakościowe obrazy strug paliwa różnych paliw przedstawiono na rys. 6. Paliwa dobrano tak, aby charakteryzowały się różnymi cechami (tab. 1), co pozwala na wykazanie zmian w procesie rozpylenia i późniejszego ich spalania. Wyznaczono wartości średniego zasięgu strug uzyskanych podczas wtrysku różnych paliw, a także pole powierzchni tworzone przez te strugi, których wybór przedstawiono na rys. 7. Ze względu na ograniczone wymiary geometryczne komory o stałej objętości maksymalny wymiar liniowy zasięgu strugi ograniczony jest do 42 mm. Z tego powodu przy ciśnieniu 100 MPa po czasie  $t = 1$  ms uzyskano maksymalną możliwą do analizy wartość zasięgu. Nie oznacza to jednak, że zasięg strugi jest w rzeczywistości również tak ograniczany (np. przez ciśnienie powietrza).

Analiza zasięgu strug wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach paliwa nie wskazuje na istnienie różnic w ich rozpyleniu. Jednakże analiza powierzchni strug wykazuje znaczne rozbieżności.

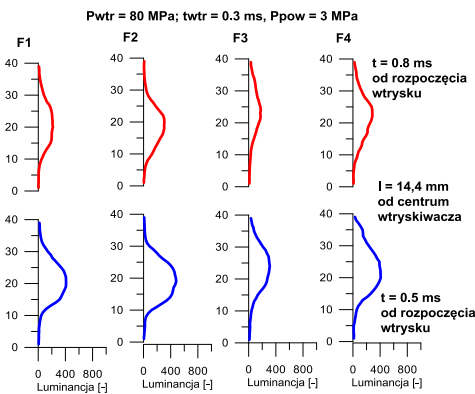


Rys. 6. Rozpylenie badanych paliw przy ciśnieniu 100 MPa; czas wtrysku  $t_{wtr} = 0,7$  ms; czas od rozpoczęcia wtrysku wynosi 0,4 ms

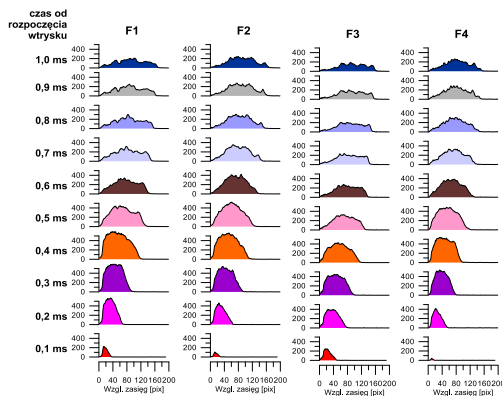


Rys. 7. Analiza zasięgu i powierzchni strug wtryskiwanego paliwa (wartości uśrednione z ośmiu strug paliwa)

Badania geometrii strugi wtryskiwanego paliwa poparto również analizą luminancji światła odbitego od strugi w przekroju poprzecznym oraz przekroju podłużnym. Na rysunku 8 przedstawiono porównanie przekrojów poprzecznych strug dla dwóch czasów od rozpoczęcia wtrysku: dla  $t = 0,5$  ms oraz  $t = 0,8$  ms. Widoczne jest znaczne zmniejszenie luminancji dla paliw F2 i F4. Paliwa te zawierają w swoim składzie etanol, co wpływa na znaczną zmianę (zmniejszenie) stężenia paliwa w rdzeniu strugi.



Rys. 8. Przekroje pionowe strug różnych paliw wtryskiwane do komory pod ciśnieniem 3 MPa

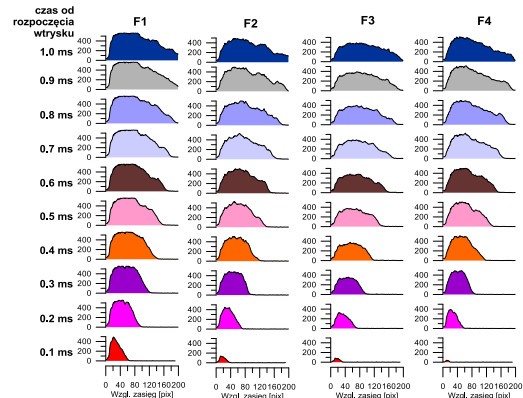


Rys. 9. Przekroje poziome strug różnych paliw wtryskiwane do komory pod ciśnieniem 3 MPa w kolejnych przedziałach czasu (warunki wtrysku  $P_{wtr} = 80$  MPa,  $t_{wtr} = 0,3$  ms)

Analiza przekroju poprzecznego (rys. 8) wskazuje na znacznie mniejszą koncentrację strugi paliwa w przypadku paliwa F3 (mieszanina ON oraz butanolu oraz DEE). Mimo, że gęstość tego paliwa nie różni się od gęstości paliwa F2 ( $\rho = 831 \text{ kg/m}^3$ ) przekrój strugi wskazuje na większą lotność, co skutkuje mniejszą luminancją przekroju strugi paliwa. Potwierdza to również analiza przekroju wzdłużnego. Wynika z niego, że paliwo F3 ma najmniejszą koncentrację paliwa w tym przekroju. Zjawisko to jest obserwowane szczególnie intensywnie w czasie rozpylenia dla  $t > 0,5$  ms.

Zwiększenie ciśnienia wtryskiwanego paliwa do 100 MPa i wydłużenie czasu wtrysku do  $t_{wtr} = 0,7$

ms skutkuje podobnymi zmianami. Paliwo F3 używa najmniejsze wartości luminancji, co świadczy o znacznym odparowaniu tego paliwa.



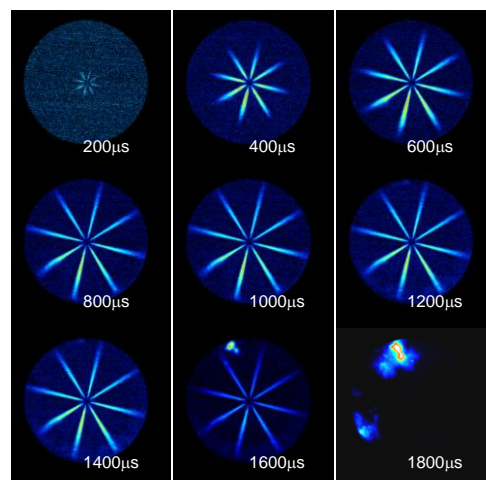
Rys. 10. Przekroje poziome strug różnych paliw wtryskiwane do komory pod ciśnieniem 3 MPa w kolejnych przedziałach czasu (warunki wtrysku  $P_{wtr} = 100$  MPa,  $t_{wtr} = 0,7$  ms)

Zróżnicowane rozpylenie tych paliw powoduje, że spodziewane są również różnice w ich zapalności. W tym celu przeprowadzono badania samozapłonu paliw w maszynie do pojedynczego cyklu. Wyniki tych badań przedstawiono w kolejnym punkcie artykułu.

## 5. Ocena samozapłonu paliw

Określenie czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni zdefiniowano w sposób następujący: jest to czas liczony od zdjęcia, na którym pojawia się wtrysk na końcówkach rozpylacza do momentu pojawienia się pierwszych ognisk gorącego płomienia, które gwarantują dalszy rozwój płomienia.

Przykład sekwencji zdjęć dla czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni przedstawiono na rys. 11.

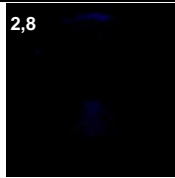
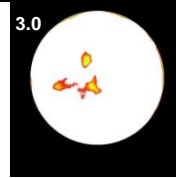
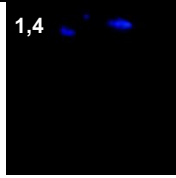
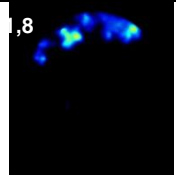
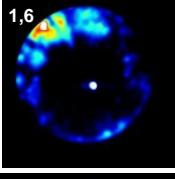
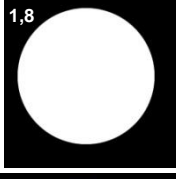
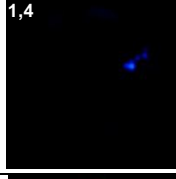
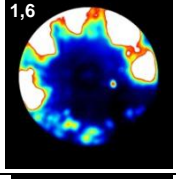
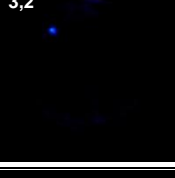
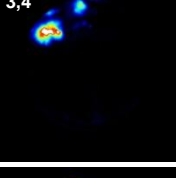
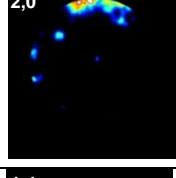
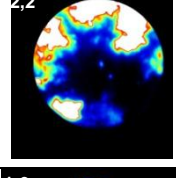
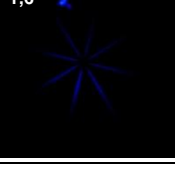
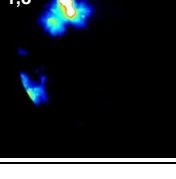
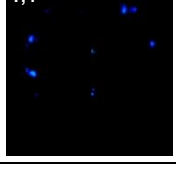
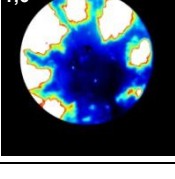


Rys. 11. Sekwencja zdjęć obrazująca sposób określenia czasu opóźnienia samozapłonu gorących płomieni ( $P_{wtr} = 100$  MPa,  $t_{wtr} = 0,5$  ms)

Badania 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 olejowi napędowemu. Ustalono, że wtryskiwana dawka będzie miała energię równą  $Q = 713$  J.

Na rysunku 12 przedstawiono zdjęcia samozapłonu paliw. Dla dwóch przypadków ciśnienia

wtrysku paliwa  $P_{wtr} = 50$  MPa (obrazy z lewej strony) oraz 100 MPa (obrazy z prawej strony) przedstawiono czas uzyskania początku samozapłonu gorących płomieni przez pojedynczą dawkę wtryskiwanego paliwa (oznaczenie  $t-SOC$  – *time of start of combustion*). Wielkość tę wyznaczono jako czas od rozpoczęcia wtrysku paliwa do momentu pojawienia się gorących płomieni jako oznakę samozapłonu poszczególnych paliw.

|   |   |  |  |   |  |
|---|---|--|--|---|--|
|    |    | F1 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 50 MPa<br>$t-SOC = 2,8$ ms<br><br>Bardzo duża dynamika rozprzestrzeniania się płomienia.                      |    |    | F1 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 100 MPa<br>$t-SOC = 1,4$ ms<br><br>Płomień stopniowo obejmuje całą komorę spalania                        |
|    |    | F2 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 50 MPa<br>$t-SOC = 1,6$ ms<br><br>Duża liczba punktów, w którym następuje samozapłon. Duża dynamika spalania. |    |    | F2 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 100 MPa<br>$t-SOC = 1,4$ ms<br><br>Zmniejszenie obszaru objętego samozapłonem w początkowej fazie.        |
|   |   | F3 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 50 MPa<br>$t-SOC = 3,2$ ms<br><br>Pierwsze ogniska samozapłonu o małej powierzchni, powolny rozwój płomienia. |   |   | F3 – $Q = 713$ J<br>Pwtr = 100 MPa<br>$t-SOC = 2,0$ ms<br><br>Zwiększenie dynamiki rozwoju płomienia. Cała komora objęta płomieniem. |
|  |  | F4 – $Q = 713$ J<br>$t-SOC = 1,6$ ms<br><br>Płomień po stosunkowo długim czasie (2,0 ms) obejmuje całą komorę spalania.                  |  |  | F4 – $Q = 713$ J<br>$t-SOC = 1,4$ ms<br><br>Płomień obejmuje całą komorę spalania po 1,8 ms od początku trwania procesu.             |

Rys. 12. Obrazy samozapłonu paliw węglowodorowych wtryskiwanych przy różnych ciśnieniach paliwa dla różnych dawek

Z przedstawionych na rys. 12 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 powoduje 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.

Warunki łatwej zapalności paliwa F2 potwierdzają badania wcześniejsze (rys. 7), w których uzyskano mniejszą powierzchnię strugi rozpylanego paliwa. Jednak analiza przekroju poprzecznego i wzdłużnego nie wskazuje jednoznacznie na mniejsze stężenie paliwa w rdzeniu strugi (rys. 8 i 9). Pozwala to na stwierdzenie, że mieszanina oleju napędowego z etanolem jest paliwem pozwalającym na uzyskiwanie niewielkich wartości opóźnienia samozapłonu. Powoduje to możliwość uzyska-

nia 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 ograniczenie 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. 12 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).

## Podsumowanie

Przedstawione badania wskazują na możliwości zastosowania paliw alternatywnych w systemach spalania silników o zapłonie samoczynnym. Paliwa te charakteryzują się innymi właściwościami fizy-

kochemicznymi, co prowadzi do odmiennych warunków rozpylenia paliwa i spalania. W szczególności należy stwierdzić, że:

a) 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;

b) Niewielkie wartości ciśnienia wtrysku pozwalają na określenie różnic w rozwoju strugi paliwa. Paliwo zawierające etanol ma znacznie większą powierzchnię strugi niż pozostałe po około 0,8 ms od rozpoczęcia wtrysku;

c) Paliwa z dodatkiem etanolu charakteryzują się dużą zmiennością intensywności świecenia (reje-

strowanej luminancji) rdzenia strugi paliwa, co świadczy o dużej szybkości odparowania tej mieszaniny;

d) Paliwa zawierające etanol pozwalają na ograniczenie okresu opóźnienia samozapłonu, szybkie odparowanie paliwa, a w konsekwencji należy się również spodziewać ograniczenia emisji składników szkodliwych spalin.

### Acknowledgments/Podziękowania

Badania wykonano w ramach projektu PowerFul FP7 POWERtrain for Future Light-duty vehicles, nr 234032.

### Nomenclature/Skróty i oznaczenia

DEE Diethylether/dietyleter

$P_{\text{pow}}$  Air back-pressure/przeciwciśnienie powietrza

$P_{\text{wtr}}$  Fuel injection pressure/ciśnienie wtrysku paliwa

### 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 Biodiesel 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.

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

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



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

*Dr hab. inż. Krzysztof Wislocki, prof. PP – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.*



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

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



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

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

