

Michał T. BIAŁKOWSKI*
T. PEKDEMİR
M. BRAUTSCH
D.P. TOWERS
G. ELSEBETT

Pomiary gęstego aerozolu oleju rzepakowego za pomocą fazowej anemometrii dopplerowskiej

Strugi gęstego oleju rzepakowego (RSO) rozpylone pod wysokim ciśnieniem zostały przebadano metodą fazowej anemometrii dopplerowskiej (PDA). Próbkę zimnego sprężonego oleju były wstępnie ogrzewane i wtryskiwane pod różnym ciśnieniem (56,3; 76,0; 93,8; 112,5; 131,3 MPa) do osrodka o sześciu różnych gęstościach (3; 6; 15; 30; 45; 60 kg/m³). Duża gęstość RSO w istotnym stopniu oddziałuje na jakość pomiaru rozmiarów kropli i prowadzi do podobnych trudności na jakie napotkano podczas badań gęstego aerozolu oleju napędowego.

Testy rozmiarów kropli wymagały analizy wpływu napięcia fotopowielacza (PMT) oraz warunków wtrysku na określenie wielkości kropli. Dla prowadzonych badań najodpowiedniejsza czułość PMT została określona przy 1000 V. Rozkład rozmiarów kropli wykazał, że wzrost ciśnienia otoczenia skutkuje deformacją Gaussowskiego rozkładu wymiarów kropli przez przyrost liczby kropli o małych wymiarach. Ponadto, wzrost zarówno ciśnienia wtrysku, jak i ciśnienia osrodka powoduje zmniejszenie średniej średnicy kropli oraz wyraźny spadek liczby uwzględnianych kropli.

Mimo trudności z zastosowaniem techniki PDA do badań aerozolu RSO można wysnuć wniosek, że metoda może być z powodzeniem stosowana, pod warunkiem odpowiedniego dostosowania parametrów PDA.

Słowa kluczowe: struga rozpylonego oleju rzepakowego, gęsty aerozol, fazowa anemometria Dopplera

Phase doppler anemometry measurements of a dense rapeseed oil spray

High pressure, dense rapeseed oil (RSO) sprays have been investigated using a Phase Doppler Anemometry (PDA) setup. Samples of cold pressed RSO were pre-heated and injected at various pressures (56.3, 76.0, 93.8, 112.5, 131.3 MPa) and six different ambient densities (3, 6, 15, 30, 45, 60 kg/m³). High density of RSO significantly affects the quality of sizing measurements, and leads to the similar experimental problems which have been found for the dense Diesel spray. The sizing tests involved analysis of the influence of the photomultiplier (PMT) voltage and injection conditions on droplet validation. The sensitivity of the PMT at 1000 V was found as the most appropriate in the performed tests. The droplet size distributions revealed that the increasing ambient pressure results in a deformed Gaussian drop size distribution having larger number of small droplets. Furthermore, the increasing injection and ambient pressures lower the mean droplet diameter but result in the significant decrease of the droplet validation.

Despite the experimental difficulties of applying the PDA technique to RSO sprays it is concluded the method can be successfully used if the appropriate adjustment of PDA parameters is undertaken.

Key words: rapeseed oil spray, dense spray, Phase Doppler Anemometry

1. Wstęp

Olej rzepakowy (RSO) jest od dłuższego czasu obiektem zainteresowania jako potencjalny zamiennik oleju napędowego. Wiele publikacji sygnalizuje obiecujące wyniki uzyskane po zastosowaniu oleju rzepakowego w różnych silnikach wysokoprężnych [6, 10, 23, 25, 28]. Jednakże niektórzy badacze wskazują na niecałkowite spalanie, które może być skutkiem niecałkowitego spalania mieszanki powietrza i RSO [11, 24, 26, 27, 30] lub różnych wymiarów kropli.

Oczywiście zamiana oleju napędowego dowolnym paliwem nie pochodzącym z przeróbki ropy naftowej zależy od tego, czy olej zastępczy charakteryzuje się podobną skłonnością do tworzenia aerozolu. Dlatego takie parametry jak średnia średnica Sautera, średnica arytmetyczna czy średnica De Broukera powinny stanowić wskazówki do przeprojektowania lub modyfikacji układu wtryskowego i systemu spalania, takiego, by stały się one zdolne do pracy na czy-

1. Introduction

There has been an increasing interest in rapeseed oil (RSO) as a potential Diesel substitute. A number of literature publications have reported promising results of RSO operation in various Diesel engines [6, 10, 23, 25, 28]. However, some researchers stresses on an incomplete combustion which might have occurred due to incomplete combustion of the air/RSO mixture [11, 24, 26, 27, 30] or different droplet sizes.

It is apparent that the successful substitution of Diesel by any non-crude oil based fuel will be depending on whether they possess the same spray characteristic. Therefore, the parameters like the Sauter, arithmetic or De Broukera mean diameters should provide guidelines for redesigning or modification of injection and combustion systems to make them capable to operate on neat RSO. The tests should provide a similar set of results which had been already collect-

stym RSO. Badania powinny dostarczyć podobnych wyników, jakie uzyskano dla oleju napędowego [3, 15, 20, 22] lub jego zamienników [21].

Technika fazowej anemometrii dopplerowskiej (PDA) jest jednym z najdokładniejszych narzędzi do badania rozpylonego paliwa, choć jest ona skomplikowana i wymaga wielu wstępnych badań poprzedzających zasadnicze testy. Główna trudność polega na jej stosowalności do określonego rodzaju aerozolu, jako że w większości przypadków aerozol charakteryzuje się dużą gęstością w zasadniczym stopniu wpływającą na jakość pomiaru [18]. Ważne jest, aby określić te problemy i zorientować się, jak metodę PDA dopasować do planowanego eksperymentu. Najnowsze dostępne źródła literaturowe dostarczają wyczerpujący przegląd zastosowań metody PDA do badań silników wysokoprężnych, lecz jak dotąd nie przeprowadzono odpowiedniej analizy w odniesieniu do RSO. Można mieć nadzieję, że rozpoznane problemy pomiarowe będą mogły znaleźć swe odniesienie dla RSO cechującego się odmiennymi właściwościami fizycznymi, głównie większą gęstością i lepkością.

2. Dotychczasowe badania metodą PDA

Większość z ostatnio zrealizowanych badań metodą PDA wykonano w nierzeczywistych warunkach silnikowych, tzn. przy niewielkim ciśnieniu wtrysku do ośrodka o ciśnieniu atmosferycznym [8, 9, 12, 13]. Wiadome jest, że w przypadku gęstych aerozoli oleju napędowego wyższe ciśnienie otoczenia zmniejsza możliwości prawidłowej obserwacji przy pomocy PDA. Wartość wyników pomiaru PDA w przypadku rozpylonego oleju napędowego była zwykle problematyczna ze względu na obecność dużych kropeł, które nie zawsze były uwzględniane w pomiarze. Koo z zespołem [16] zmniejszyli ciśnienie ośrodka z 21 MPa do 0,6 MPa by uniknąć gęstego aerozolu i poprawić dokładność. Również Araneo i Tropea [2] poprzez wydłużenie okresu wtrysku starali się osiągnąć quasi-stacjonarny aerozol i przyjęli bardzo niską wartość współczynnika kulistości (30%) w celu uzyskania danych na temat aerozolu oleju napędowego wytwarzanego w systemie *common rail*. Zastosowany układ pozwolił uzyskać dużą rozdzielczość co kompensowało bardzo małą wartość współczynnika kulistości.

Ograniczenia techniki PDA w zastosowaniu do badań gęstych aerozoli wyczerpująco omawiane są przez Ficarelę i współpracowników [7]. Badano gęsty aerozol pochodzący z systemu *common rail* a oceny prędkości i wielkości kropeł dokonano dzięki możliwościom układu pomiarowego PDA. W artykule Wigley'a i współpracowników [29] oraz Kashdana i współpracowników [14] wykorzystano odmienne podejście w celu takiego zastosowania techniki LDA/PDA, by możliwe były pewne pomiary kropeł o większej średnicy. Publikacje te skupiały się na zastosowaniu techniki PDA do pomiarów w warunkach quasi-statycznych i gęstego aerozolu.

Lacoste i inni [19] zastosowali technikę PDA do badania aerozolu oleju napędowego wytworzonego w systemie *common rail* przy trzech różnych ciśnieniach wtrysku (100, 140 i 160 MPa). Autorzy rozpoznali podstawowe zasady metody PDA i główne trudności wynikające z zastosowanie tej

ed for Diesel spray reported in [3, 15, 20, 22] or its alternative [21].

Phase Doppler Anemometry (PDA) technique is one of the most accurate device to study a fuel spray, however the technique is complicated and requires a range of preliminary studies prior to the actual spray measurement. The main obstacle is its applicability to a considered type of spray, as in the most cases sprays is featured by a high density significantly affecting quality of measurement [18]. It is important to recognise these experimental problems to get to know how a PDA system can be tailored before measurement can be undertaken. The recent available literature resources offer a fairly satisfactory review on the PDA application in Diesel studies, but similar comprehensive studies on RSO have not been performed yet. It is expected that the already recognised experimental problems would be more pronounced for RSO due to its different physical properties, mainly due to its higher density and viscosity.

2. Previous PDA studies

Most of the recent PDA test have been performed at unrealistic engine conditions, i.e. low injection pressures and atmospheric conditions [8, 9, 12, 13]. It is recognised that a higher ambient pressure results in a dense Diesel spray more unlikely to be successfully acquired by PDA. High validation of PDA measurement of Diesel sprays has always been problematic due to a presence of large droplet sizes, which were not always validated. Koo et al. [16] reduced the ambient pressure from 21 MPa to 0.6 MPa in order to avoid getting dense sprays and enhance validation. Also, increasing of injection duration to create a quasi-stationary spray and accepting very low sphericity validation factor (30%) was applied by Araneo and Tropea [2] to collect results of Diesel sprays produced in a common rail system. The used setup provided a high validation which was compromised by a very low sphericity factor of 30%. The limitation of the PDA technique used to test dense sprays was widely discussed by Ficarella et al. [7]. A dense spray of common rail system was investigated and the velocity and diameter validations analysed in connection to the PDA setup and power. Different approaches to establish the LDA/PDA technique that would allow measurements to be made over a wide drop size range with confidence were presented in paper of Wigley et al. [29] and Kashdan et al. [14]. The publications concentrate on applications of PDA under quasi-steady conditions and dense spray discussing the possible solutions.

Lacoste and his colleagues [19] used PDA to explore a Diesel spray produced using a common rail injection system at three feeding pressures (100, 140 and 160 MPa). Authors reviewed the fundamental principles of PDA and the main difficulties in application of the technique in high pressure Diesel sprays. In addition to the errors affecting the measurement of spray in general, like defocusing, shape irregularities, some other factors make measurements of the dense Diesel spray fairly difficult. An overlapping signal due to a "multiple occupancy" in the measuring volume is one of the main obstacle. A possible solution suggested by the authors

techniki do rozpylonego oleju napędowego pod wysokim ciśnieniem. Oprócz znanych błędów związanych z tym pomiarem jak utrata ostrości czy nieregularności kształtu, wymieniono jeszcze inne czynniki, które dodatkowo utrudniają pomiar gęstej strugi wtryskiwanego oleju napędowego. Jako główną przeszkodę wymienić można nakładanie się sygnałów wynikające z „wielokrotnego przebywania” w objętości pomiarowej. Zaproponowane przez autorów możliwe rozwiązanie tego problemu polega na zmniejszeniu objętości kontrolnej, co jednak może prowadzić do zmniejszenia obszaru pomiarowego oraz liczby prążków interferencyjnych. Mała objętość pomiarowa może również skutkować zakłóceniami sygnału przez kroplę poruszającą się w pobliżu okna pomiarowego. Wykazano, że mimo trudności, technika PDA może dostarczyć cennych wyników dotyczących prędkości aerozolu i wielkości kropeł. Mimo wszystko jednak wyniki mogą okazać się nie w pełni zadowalające.

W podobnej pracy Lacoste i inni [18] jeszcze bardziej skoncentrowali się na charakterystyce gęstych aerozoli paliwa w systemie *common rail*. Technikę PDA zastosowano do pomiarów wymiarów kropli i ich prędkości w silniku. Autorzy starannie zbadali wpływ różnych parametrów układu na charakterystykę rozpylenia. Badania mocy lasera, napięcia fotopowielacza i objętości pomiarowej wykazały wyraźny ich wpływ na mierzone średnice kropeł i wymaga dokładnej regulacji przed przystąpieniem do pomiarów. Ciśnienie wtrysku i ciśnienie panujące wewnątrz cylindra wpływają zasadniczo na średnią prędkość kropli – wzrost ciśnienia wtrysku powoduje jej zwiększenie, a wzrost ciśnienia ośrodka – odwrotnie, jej spadek. Zwiększając ciśnienie w cylindrze uzyskano poprawę rozpylenia. Podobne wyniki wpływu ciśnienia wtrysku uzyskali również Araneo i Coghe [1].

Kurachi ze współpracownikami [17] zastosowali układ LDV do badania oleju napędowego wtryskiwanego do wysokociśnieniowego naczynia w temperaturze pokojowej. Penetracja czoła strugi mierzona była jako opóźnienie sygnałów Dopplera od początku wtrysku do osiągnięcia przez czoło każdego z wybranych punktów pomiarowych a zasięg rozpylenia był oceniany na podstawie pomiaru odchylenia standardowego czasu opóźnienia, który wskazywał rozproszenie czasu od początku wtrysku do pojawienia się przyrostu sygnału Dopplera. Każda z mierzonych wielkości była porównywana z danymi uzyskanymi na podstawie sfotografowanych strug. Wyniki zastosowania metody Dopplera zgadzały się z wynikami uzyskanymi metodą szybkich zdjęć.

Jimenez i inni [13] opublikowali jedno z niewielu studiów dotyczących porównania charakterystyk rozpylenia paliw konwencjonalnych i biopochodnych. Za pomocą PDA mierzono były: rozkład promieniowy średnic kropli, składowa osiowa i promieniowa prędkości dla estru metylowego i oleju napędowego. Podobny wpływ rozpylenia i temperatury otoczenia jaki został zaprezentowany w [18] stwierdzono w przypadku obu paliw. Dodatkowo stwierdzono, że średnia średnica kropli zmniejsza się w temperaturze otoczenia, co wynika ze zmniejszenia lepkości estru. Osiowa średnia prędkość estru metylowego jest nieco większa niż w przypadku oleju napędowego. Można to wyjaśnić jako efekt większej

was reduction of the control volume, however which would lead to decreasing the size of the measuring space and thus the number of fringes. The small measurement volume would also result in distortion of signal by a drop passing through close to the measuring volume. It has been showed despite the difficulties PDA can provide a valuable results of the spray velocity and droplet sizes. Nevertheless, the results might not be fully satisfactory. In similar work Lacoste et al. [18] concentrated more extensively on characterisation of dense Diesel sprays in a common rail system. The PDA technique was applied to measure droplet sizes and velocities in an engine setup. Authors carefully investigated influence of various setup parameters on the spray characterisation. Studies of laser power, photomultiplier voltage and a measuring volume revealed significant effects on measured droplet diameters and need to be carefully adjusted prior to measurements. The effect of injection pressure and in-cylinder pressure showed an increase in mean droplet velocity when the injection pressure was increased and the adverse effect of the in-cylinder pressure. Increasing the cylinder pressure led to improved spray atomisation. Similar results of the injection pressure effect were found by Araneo and Coghe [1].

Kurachi et al. [17] used a LDV system to investigate diesel sprays injected into a high pressure vessel at room temperature. Spray tip penetration was measured by the delay time of Doppler signals from injection start to spray tip arrival at each measuring point and spray breakup length was estimated by measuring the standard deviation of the delay time which indicated dispersion of the time from injection start to the Doppler signal rising. Each measured data was compared with the data estimated from spray photographs. Results of the Doppler method were well agreeing with the conventional the high speed camera technique.

One of the few studies on a comparison between conventional and bio-derived fuel spray characteristics was provided by Jimenez et al. [13]. Radial distributions of drop size, axial and radial velocity components were measured using a PDA for methyl ester and Diesel fuel. Same effect of spray injection and ambient pressure as presented in [18] were found for the both fuels. Additionally, it was found that the droplet mean diameter decreased with ambient temperature due to reduction of ester viscosity. Axial mean velocity of methyl ester were found slightly higher than for Diesel. Such effect was explained as a consequence of the higher viscosity leading to the poorer atomisation. Spray penetration results were adjusted to an empirical equation. The paper of Jimenez is a rare example of studies on bio-fuels where PDA had been applied. In this paper authors aim to validate applicability of the PDA setup to measure the dense RSO sprays and present some of the results collected during the preliminary sizing test.

3. Experimental details

The experiments were carried out using a two component experimental system comprises a Doppler laser unit and an injection system. The injection system consists of a bench

lepkości powodującej gorsze rozpylenie. Uzyskane wyniki zasięgu strugi zostały dopasowane do równania empirycznego. Artykuł Jimenez jest rzadkim przykładem prac nad biopaliwami, w których posłużono się metodą PDA.

W niniejszej pracy autorzy zamierzali ocenić stosowność metody PDA do pomiaru gęstości strug RSO i przedstawić niektóre wyniki zebrane podczas wstępnych testów.

3. Szczegóły doświadczenia

Doświadczenie wykonano używając układ dwuelementowy składający się z lasera Dopplera oraz układu wtryskowego. Układ ten zawiera stanowiskową wersję układu Bosch GDI współpracującego z komorą wtryskową wysokiego ciśnienia. W komorze umieszczono seryjny wielootworowy, bezstudzienkowy wtryskiwacz Mercedes (A6110700587, o średnicy otworków 0,2 mm i długości 0,92 mm) współpracujący z systemem *common rail*. Więcej danych dotyczących układu pomiarowego znaleźć można w pracy [5].

W doświadczeniu użyto próbki tłoczonego na zimno oleju rzepakowego o trzech różnych temperaturach. Próbkę oleju zostały wstępnie przygotowane na stanowisku badawczym i podgrzane przed wtryskiem. Temperatura paliwa była kontrolowana w trzech różnych punktach układu i niezależnie rejestrowana i regulowana. Rozpylenie paliwa następowało przy różnych ciśnieniach ośrodka wytwarzanych z wykorzystaniem sześciofluorku siarki (SF_6) i azotu. Ciśnienie ośrodka zmieniane było za pomocą dwustopniowego układu sterującego z wbudowanym grzejnikiem gazu koniecznym dla utrzymania stałej temperatury przez cały okres eksperymentu. Tablica 1a zawiera dane dotyczące warunków wtrysku i innych parametrów doświadczenia oraz niektórych właściwości oleju rzepakowego.

Aparaturę do Fazowej Anemometrii Dopplerowskiej dostarczyła firma Dantec (Wlk. Brytania); została ona użyta do określenia średnich średnic: arytmetycznej, Sautera i De Broukere, jak również przeciętnej prędkości kropli RSO. Źródłem światła był laser argonowo-jonowy zapewniający promień o dwóch długościach fali świetlnej: zielonej ($\lambda = 514,5$ nm) i niebieskiej ($\lambda = 488,0$ nm). Promienie te docierały do czujnika

scale Bosch CDI system combined with the high pressure spray chamber. The chamber accommodated a commercial, seat-hole Mercedes (A6110700587) common-rail injector (0.2 mm bore-diameter and bore length of 0.92 mm). More details of the experimental setup are presented in [5].

Samples of cold pressed RSO were used in experiments at three different oil temperatures. Oil samples were pre-conditioned in the injection stand and pre-heated prior to the injection. The fuel temperature was controlled at three different points of the setup and independently monitored and adjusted. Spray atomisation took place at various ambient pressures created using the pressurised sulfur hexafluoride (SF_6) and nitrogen. The ambient pressure was altered by a two stage pressure control system with a build-in gas heater to maintain a constant ambient temperature throughout the experiments. Table 1a lists full injection conditions and experimental parameters and some properties of RSO.

A Phase Doppler Anemometry instrument provided by Dantec UK was employed to obtain arithmetic, Sauter and De Broukere mean diameters as well as an average droplet velocity of RSO. The light source was an Argon-Ion laser provided beams at two wavelengths, green ($\lambda = 514.5$ nm) and blue ($\lambda = 488.0$ nm). The beams were transmitted to the PDA probe through an optical fibre and then focused at the measurement volume at a focal length of 600 mm from the PDA transmitter and 30 mm downstream from the nozzle tip. The experimental PDA optical set-up is schematically showed in Figure 1. The details of the experimental PDA adjustment are placed in Table 1b.

4. Experimental procedure

All the sizing test were performed using two dimensional PDA setup, whereas the raw data processing was carried out with the 1D configuration only due to better validation and proper statistical presentation of the drop populations. A similar approach of a dense spray analysis was applied by Lacoste et al. [19] working with high pressure Diesel sprays. Details on the experimental setup and the procedure can be found in [4, 5].

Tab. 1. Właściwości oleju rzepakowego i warunki eksperymentu (a) oraz parametry badań PDA (b)

Table 1. Fuel properties of RSO and the experimental condition (a), final PDA setup(b)

a)		b)	
Gęstość w temp. 20°C [kg/m ³]/ Density at 20°C [kg/m ³]	921,1	Rozdziel promieni [mm]/ Beam separation [mm]	25
Lepkość w temp. 20°C [mm ² /s]/ Viscosity at 20°C [mm ² /s]	73,78	Odległość między prążkami interferen- cyjnymi [μm]/Fringe spacing [μm]	12,350; 11,714
Temperatura paliwa w zbiorniku [°C]/ Oil tank temperature [°C]	30; 40; 60	Liczba prążków/Number of fringes	12
Ciśnienie wtrysku [MPa]/ Injection pressure [MPa]	56,3; 76,0; 93,8; 112,5; 131,3	Zakres prędkości [m/s]/ Velocity bandwidth [m/s]	-37,0 do 111,1
Temperatura w cylindrze [°C]/ In-cylinder temperature [°C]	20	Maksymalna średnica [μm]/ Maximum diameter [μm]	178,82
Gęstość ośrodka w cylindrze [kg/m ³]/ In-cylinder densities [kg/m ³]	3; 6; 15; 30; 45; 60	Wskaźnik refrakcji cząstki/ośrodka /Particle/medium refractive index	1,41-1,47/1
Częstotliwość wtrysku [Hz]/ Injection frequency [Hz]	1,0	Poziom czułości [dB]/ Validation level [dB]	-3
		Maksymalne odchylenie kulistości [%]/ Max. spherical deviation [%]	15

PDA światłowodami, a następnie były ogniskowane w przestrzeni pomiarowej w odległości 600 mm od przekaźnika PDA i 30 mm poniżej końcówki wtryskiwacza. Układ pomiarowy pokazano schematycznie na rysunku 1. Szczegóły ustawienia układu PDA podczas doświadczenia pokazano w tabelicy 1b.

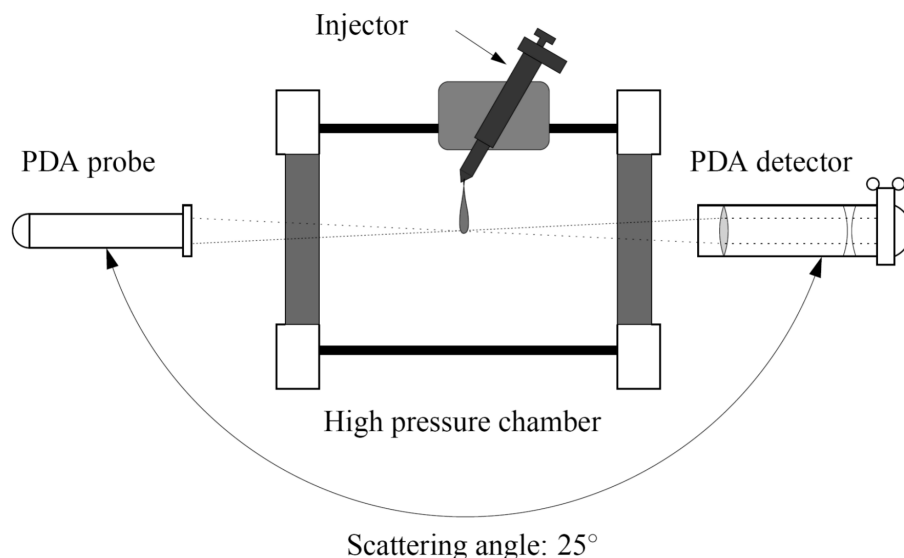
4. Procedura prowadzenia eksperymentu

Wszystkie badania rozmiarów kropli przeprowadzono wykorzystując technikę dwuwymiarowej anemometrii PDA, podczas gdy obróbkę danych wykonano stosując jednowymiarową konfigurację ze względu na lepszą czułość i właściwe przedstawienie statystyczne zbioru kropli. Podobną metodę analizy gęstych aerozoli zastosowali Lacoste i inni w badaniach nad olejem napędowym rozpylonym pod wysokim ciśnieniem. Szczegóły stanowiska i procedury badawczej można znaleźć w pracy [4, 5].

Każdy pomiar wtrysku i warunków otoczenia trzykrotnie powtarzano w tym samym punkcie dla siedmiu kolejnych wtrysków. Objętość pomiarowa znajdowała się w osi strugi, przy czym maksymalne odchylenie od tej linii wynosiło ± 1 mm. Oś strugi została wyznaczona przez skanowanie prędkości w kierunku osi X, Y i Z. Przekaznik PDA został ustawiony pod kątem 4° . Układ optyczny odbierający sygnał umieszczono w odległości 310 mm od objętości pomiarowej pod kątem 21° . Stąd układ PDA pracował z kątem rozproszenia 25° . Osiołość, zogniskowanie PDA i weryfikacja pomiarów zostały określone za pomocą rozpylacza wody dostarczającego krople w zakresie średniej średnicy Sautera równej $\sim 10 \mu\text{m}$.

Przed rozpoczęciem pomiarów układ musiał być cechowany w celu doboru właściwego napięcia fotopowielacza (PMT) i poziomu czułości. Sprawdzono cały zakres napięć fotopowielacza, zarejestrowano średnią średnicę kropli i ją porównano. Dodatkowo zarejestrowano i zanalizowano pewną liczbę udanych pomiarów (bez nasycenia sygnału). Czułość układu PMT ostatecznie ustawiono na 1000 V, podczas gdy napięcie zapewniające pomyślny przebieg badań zmieniało się w zakresie 900 do 1200 V. Dla napięcia 1000 V sygnał losowo ulegał nasyceniu i układ wymagał ponownej stabilizacji. Dane dotyczące ustawienia PDA pokazano w tabelicy 1b. Należy podkreślić, że pomiar gęstych aerozoli nadal jest bardzo trudny. Zmniejszenie niektórych błędów było ogromne, podczas gdy innych nie udało się uniknąć.

Ostateczny wynik uzyskano na podstawie przeciętnego zbioru kropli i obróbki zarejestrowanych zgrubnych danych. Zastosowano filtr statystyczny w celu oddzielenia nienormalnych średnic kropli i poprawienia wiarygodności wyników. Filtr ten został zbudowany w oparciu o analizę statystyczną zbiorów kropli pasujących do rozkładu Gaussa. Przyjęto, że krople większe aniżeli $3\sigma +$ średnia (σ jest od-



Rys. 1. Schemat układu do pomiarów metodą PDA

Fig. 1. Representation of the setup for PDA measurement

The measurement for each injection and ambient condition was repeated 3 times at the same point for 7 consecutive injections. A measurement volume was located in the centreline of the spray with the maximum deviation from the centreline of ± 1 mm. The centreline of a spray was found by scanning of spray velocities in X, Y and Z direction. The PDA transmitter was positioned at an angle of 4° . The receiving optics were located at 310 mm from the measurement volume at 21° . Hence the PDA system was operating at the scattering angle of 25° . The alignment, focus of the PDA and validation of the measurements were checked with a water nebuliser resulting in a droplets spectrum of Sauter mean diameter of $\sim 10 \mu\text{m}$.

Prior to the spray measurements the system required calibration to chose suitable photo-multiplier (PMT) voltage and the validation level. A range of PMT voltage was scanned and drop mean diameter was recored and compared. Additionally, the number of successful measurements (without signal saturation) for each seat of PMT voltage was recorded and analysed. The sensitivity of the PMT was finally set to 1,000 V whereas the voltage for successful completion of the test varied between 900 V and 1,200 V. Randomly at 1,000 V the PDA signal got saturated and it was necessary to restabilise the PMT. A summary of PDA setup is presented in Table 1b. It needs to be stressed that measurements of dense sprays of RSO remains very difficult. Reduction of some errors is highly immense and some of them are even unavoidable.

The final presentation was based on the average drop population and processed raw output data. A statistical filter was established to separate abnormal drop sizes and to improve data reliability. The filter was build based on statistical analyses of drop populations fitting into the Gaussian distribution. It has been accepted that drop larger than $3\sigma +$ mean (σ : the standard deviation) and of lower attendance than 2% in a population were rejected.

chyleniem standardowym) i stanowiące mniej niż 2% w zbiorze były odrzucane.

5. Wyniki i dyskusja

Pomiary przeprowadzono dla trzech różnych temperatur oleju, choć stwierdzono, że najlepsze rozpylenie uzyskano dla temperatury najwyższej. Wynika to ze zmniejszonej lepkości i napięcia powierzchniowego oleju. Przytaczane wyniki odnoszą się do temperatury 60°C.

Typowy sygnał przedstawiający chwilową prędkość kropli pokazano na rysunku 2a. Można zauważyć, że detektor PDA rejestruje krople o określonej szybkości i czasie dotarcia do celu nie tylko podczas samego wtrysku, ale również po zakończeniu impulsu wtrysku. Rysunek pokazuje krople zebrane po procesie przepłukania, które odpowiadają liczbie „kropli satelitów” znajdujących się w komorze. Taka pozostałość kropli przenosi się od wtrysku do wtrysku w wyniku ruchu gazów wywołanego rozpyleniem, które także powoduje pojawienie się „ogona” składającego się z wolno poruszających się kropli. Zjawisko to przypomina wyniki opisane w [18, 19]. Obecność pozostałości kropli można usunąć stosując procedurę filtrowania, jeśli znany jest czas próbkowania, choć ich wyeliminowanie w pobliżu impulsu wtryskowego jest trudne. W przedstawianych wynikach z końcowych rozkładów prawdopodobieństwa usunięto jedynie „krople-satelity”. Należy zwrócić uwagę, że na wyniki pomiarów RSO może wpływać obecność nienormalnie dużych kropli, szczególnie w pobliżu punktu pomiarowego. Może to prowadzić do stwierdzenia większej liczby dużych kropli niemal w każdym zbiorze. W porównaniu ze spodziewanym rozpyleniem oleju napędowego, zbiór kropli RSO składa się ze znacznej liczby dużych kropli w zakresie średnic 60-100 μm . Udział tych dużych kropli o średnicach D_{32} i D_{10} jest znaczący, jednakże większa liczba kropli o małej średnicy nie wpływa na zmniejszenie wartości średniej średnicy kropli, jak długo zauważalna liczba dużych kropli pozostaje w zbiorze. Jednak wcześniejsze badania [19] wskazują na obecność kropli o średnicy do 500 μm przy dużo niższych ciśnieniach.

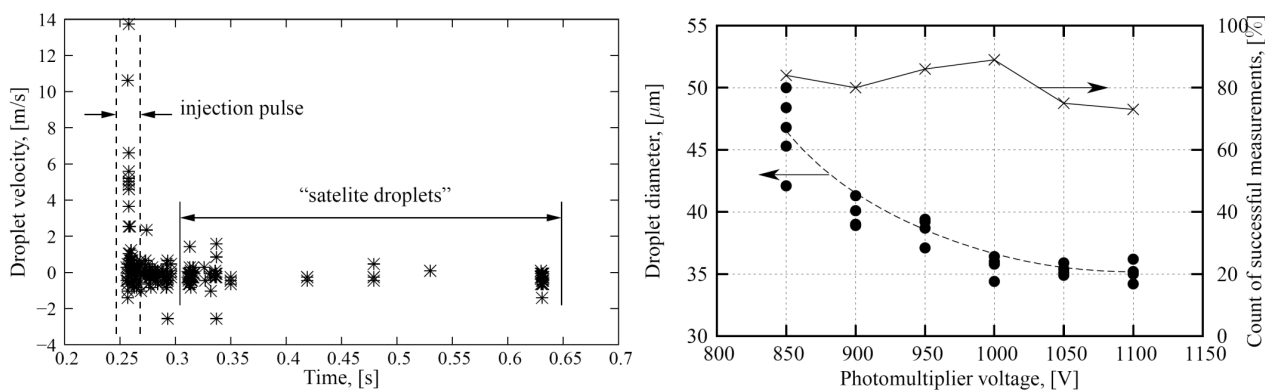
Jak wspomniano wcześniej, regulacja napięcia fotopowielacza PMT wpływa na niezawodność i powtarzalność pomia-

5. Results and discussion

The measurements have been undertaken at three different oil temperatures, however it has been found that the best atomisation was reached at highest one. This is due to reduced viscosity and surface tension of oil. Hence the following results represent the highest temperature of 60°C.

A typical injection signal presenting the instantaneous droplet velocities is shown in Figure 2a. It can be seen that PDA detection collects droplets of arrival time and velocity not only during the injection but also after the injection pulse. The figure indicated drops which have been collected after the scavenging process and are due to the number of “satellite drops” present in the chamber. Such droplet residue is carried over from one injection onto another as a result of gas motion caused by spray, which also forms a “tail” consisting of slow motion floating droplets. The occurrence is similar to the findings recored in [18] and [19]. The presence of the residual drops can be excluded by applying a filtering procedure if a triggering time is known, however the expulsion of drops close to the injection pulse is difficult. In the presented results only the “satellite drops” have been removed from the final distribution sets. It needs to be highlighted that the RSO measurements could be effected by number of “abnormally large” drops present especially close to the measuring point. This might lead to the higher number of large drops present in nearly each drop population. In general the RSO drop population consisted of a significant number of larger drops within a range of 60-100 μm in comparison to the expected Diesel spray. Contribution of these large drops in values of D_{32} and D_{10} is significant, thus the increased number of small drops does not result in reduced values of mean drop diameters since the noticeable number of large drops is present in the population. However, an earlier study [19] indicates droplet diameters of Diesel fuel up to 500 μm for much lower injection pressures.

As discussed previously above, the PMT voltage adjustment influences measurements reliability and repeatability and there is a range of possible PMT voltages which can be used to provide such measurements. Although the final



Rys. 2. Przedstawienie składowej osiowej prędkości kropli (U) w funkcji czasu zbierania danych (a); zmiany średniej średnicy Sautera kropli w funkcji napięcia fotopowielacza (b)

Fig. 2. Presentation of the axial droplet spray velocity component (U) with the acquisition time (a), Variation of the mean Sauter droplet diameter with the photomultiplier voltage (b)

rów; istnieje szereg możliwych napięć PMT, jakie można zastosować, by wykonać tego typu pomiary. Ostateczna regulacja jest kwestią doświadczenia badawczego. Rysunek 2b pokazuje wpływ napięcia PMT na średnią średnicę kropli. Można zaobserwować rosnącą liczbę rejestrowanych małych kropli wraz ze wzrostem tego napięcia. Wzrost napięcia skutkuje większą szybkością zbierania danych i częstszym nasyceniem sygnału.

Można zauważyć, że podnosząc napięcie PMT osiąga się w miarę stabilną średnicę kropli. Napięcie PMT wybrano tak, by zmaksymalizować zbieranie danych, ale również po to by uniknąć nasycenia sygnału. Ostatecznie wybrana wartość napięcia PMT 1000 V miała pogodzić zbieranie danych i zliczanie pomyślnych pomiarów. Ostatni parametr pokazano na rysunku 2b; opisuje on procent pomiarów PDA spełniających następujące kryteria prowadzenia badań:

1. brak nasycenia sygnału,
2. liczba kropli w zbiorze większa od 2000,
3. średnice kropli różniące się między sobą nie więcej niż $\pm 10\%$ odchylenia standardowego dla całkowitej liczby 10 przebiegów i wybranych warunków wtrysku.

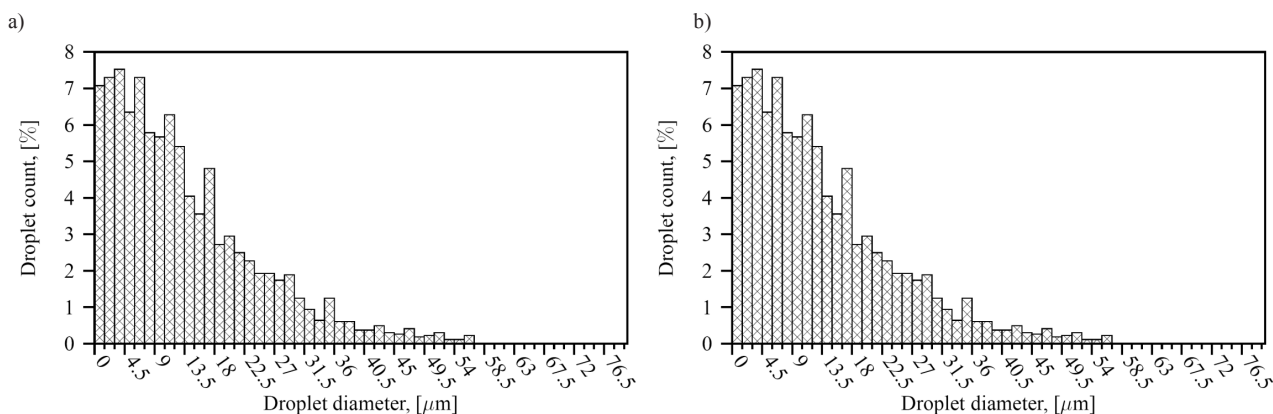
Wybrane wyniki rozkładu wymiarów kropli RSO pokazano na rysunku 3 dla dwóch różnych gęstości ośrodka: 15 i 60 kg/m³. Rozkład odpowiadający gęstości 15 kg/m³ przypomina prawie typowy rozkład normalny, rys. 3a. Dane uzyskane dla gęstości 60 kg/m³ nie układają się w podobny rozkład. Zasadniczo rozkłady rozmiarów kropli wykazywały obecność jednego piksu właściwie reprezentującego rozkład normalny średnic kropli. W większości przypadków wzrost ciśnienia ośrodka powodował deformację rozkładu normalnego w kierunku większej liczby małych kropli i wynikającej z tego większej gęstości rozpylonej strugi. Podobnego zjawiska nie zaobserwowano we wcześniejszych badaniach oleju napędowego. Można wnioskować, że wywołane ono zostało przez zwiększony opór aerodynamiczny ośrodka powodujący rozpad zarówno cząstek paliwa, jak rozpad ligandów¹⁾. Tłumaczy się to tak, że w przypadku płynów o większej lepkości jak RSO, ligandy dłużej pozostają razem (z powodu większego napięcia powierzchniowego) i w ten sposób są one rozcią-

adjustment is more likely a matter of experience. Figure 2b presents the effect of the PMT voltage on mean droplet diameter. One can see the increasing number of small droplets detected when the PMT voltage rises. An increase in voltage results in higher data rate and leads to more frequent signal saturation.

It can be seen that the increasing of the PMT voltage leads to relatively stable droplet diameter. The PMT voltage was selected to maximise the data acquisition but also to avoid signal saturation. The final voltage of 1,000 V was chosen as the best fit between the droplet acquisition and the count of successful measurements. The last parameter is depicted in Figure 2b and describes the percentage of PDA runs fulfilling the following criteria of featuring a run:

1. the lack of signal saturation,
2. the number of drops in a population greater than 2,000,
3. droplet diameter differ by a maximum $\pm 10\%$ of standard deviation for the overall value for all ten runs for a selected injection conditions.

Some selected distribution results of the RSO sizing are shown in Figure 3 for two different ambient densities 15 and 60 kg/m³ respectively. The distribution at 15 kg/m³ resembles almost typical Gaussian distribution (Fig. 3a). The data collected at 60 kg/m³ does not follow the same distribution shape. Generally, the distributions of droplet size revealed the presence of one pick well representing Gaussian droplet size distribution. Mostly, increasing ambient pressure results in a deformed Gaussian distribution having larger number of small droplets and hence a denser spray. The same behaviour has not been previously recorded for Diesel fuel. It can be concluded that such observation is caused by an effect of the aerodynamic resistance of the ambient gas enhancing the secondary break-up of drops as well as breaking up ligands. It has been elaborated that for more viscous fluids like RSO the ligands can stay together for longer (due to higher surface tension), so as the ligands are stretched by shear forces in the surrounding air and finally disintegrated tending to form smaller droplets.



Rys. 3. Rozkład rozmiarów kropli RSO przy różnych gęstościach ośrodka: a) 15 kg/m³, b) 60 kg/m³

Fig. 3. Drop size distribution of RSO at different ambient densities: a) 15 kg/m³, b) 60 kg/m³

¹⁾ Ligand – to cząsteczka albo jon, który jest w związku kompleksowym z jonem albo atomem centralnym; także atom lub cząsteczka, która w reakcji podstawienia zastępuje wodór w związkach organicznych (przyp. red.)

gane siłami ścinającymi działającymi w ośrodku, co w końcu prowadzi do rozpadu i tworzenia mniejszych kropeł.

Zmiany średniej średnicy dla dwóch skrajnych gęstości ośrodka: 15 kg/m^3 i 60 kg/m^3 wykreślono na rysunku 4. Zmierzone przeciętne średnice kropeł zostały przedstawione jako średnia średnica Sautera, średnica arytmetyczna i średnica De Broukera. Rysunek wyraźnie pokazuje, że podnosząc ciśnienie wtrysku osiąga się zmniejszenie średnic kropeł. Na rysunku 4a zbieżność opadają niemal liniowo, podczas gdy w przypadku większej gęstości ośrodka (rys. 4b) zarejestrowano szybki spadek przy wyższych ciśnieniach wtrysku. Oczywiście ciśnienie wtrysku ma trwały wpływ na tworzenie rozpylonej strugi. Średnie średnice kropeł są znacznie mniejsze przy wyższym ciśnieniu wtrysku, a zwiększając ciśnienie wtrysku ułatwia się rozpad RSO. Pokazana na rysunku tendencja odpowiada wynikom opublikowanym przez Lacoste'a i innych [18] oraz Araneo i Coghe'a [1].

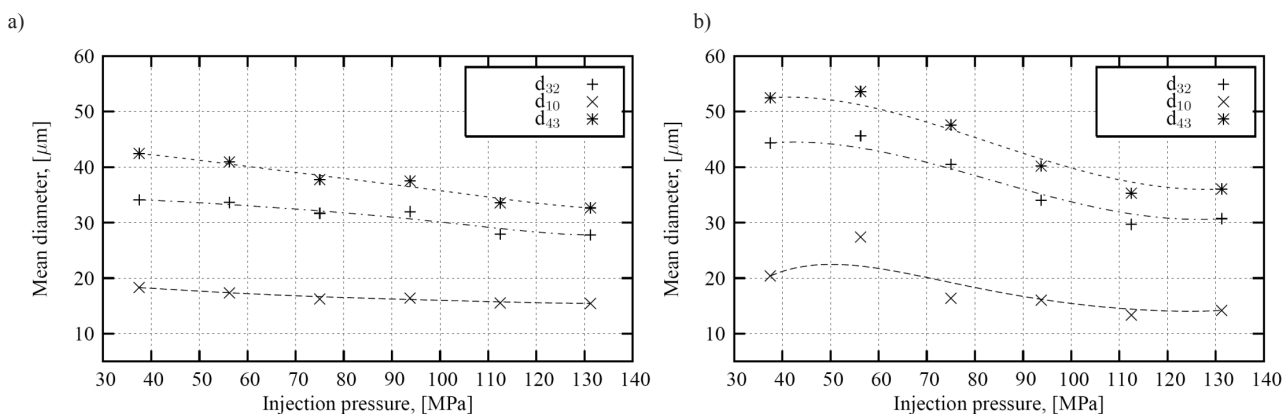
Ostatecznie, wpływ gęstości ośrodka (ciśnienia) oraz ciśnienia wtrysku na liczbę uwzględnionych kropeł pokazano na rysunku 5. Określenie „uwzględnione krople” odnosi się do procentu kropeł wziętych pod uwagę w całym zbiorze. Uwzględnionymi kroplami są te, które mieszczą się w wyznaczonych granicach prędkości (jedna składowa) i kulistości. Stwierdzono, że wykonanie pomiarów w środowisku gęstego aerozolu było szczególnie trudne. Z tego powodu studia nad wpływem gęstości ośrodka są szczególnie interesujące. Jak można zauważyć na rysunku 5a wzrost gęstości prowadzi do niemal liniowego spadku liczby uwzględnianych kropeł. Ten łatwy do przewidzenia efekt związany jest ze wzrostem gęstości aerozolu wynikającego z większych sił ścinających działających na krople. Można stwierdzić, że zjawisko to jest łatwiej zauważalne przy wyższej temperaturze oleju, która zmniejsza lepkość, gęstość i napięcie powierzchniowe oleju. Przedstawiane dane zostały zarejestrowane przy ciśnieniu $131,25 \text{ MPa}$, choć podobną tendencję stwierdzono dla całego zakresu ciśnień wtrysku.

Rysunek 5b przedstawia wpływ ciśnienia wtrysku na liczbę uwzględnionych kropeł dla dwóch różnych ciśnień ośrodka. W miarę jak wzrasta ciśnienie wtrysku, maleje liczba uwzględnianych kropeł o ok. 20% dla ciśnienia 15 kg/m^3 oraz 50% dla ciśnienia 60 kg/m^3 . Jest oczywiste, że większe

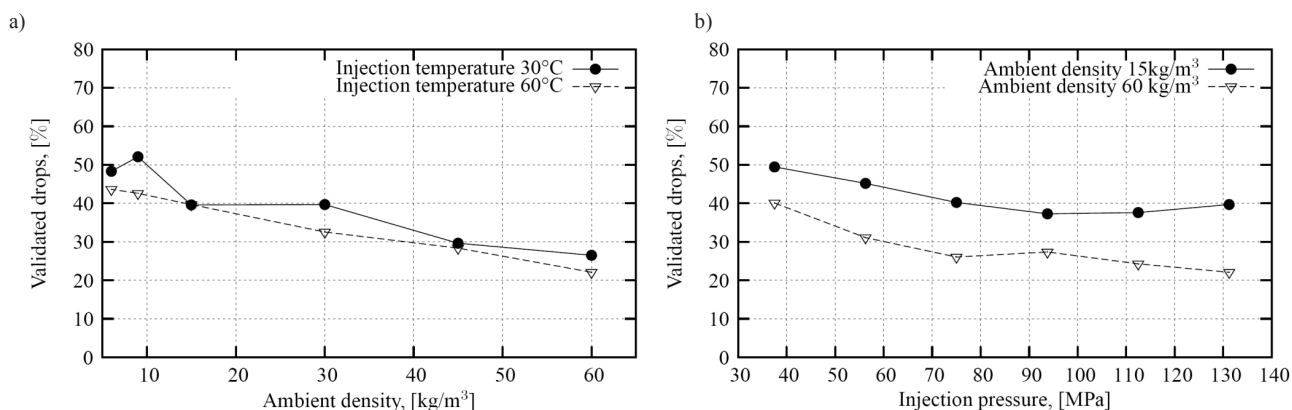
The variation of mean diameters for two extreme ambient densities: 15 kg/m^3 and 60 kg/m^3 is plotted in Figure 4. The measured average droplet diameters are presented in a form of the Sauter, arithmetic and De Broukera mean diameter. The figure clearly shows that increasing injection pressure lowers droplet diameters. In Figure 4a the slopes decrease almost linearly, whereas at higher ambient density (Fig. 4b), a rapid decrease at higher injection pressures has been recorded. It is clear that the injection pressure has an enduring effect on the spray development. The droplet mean diameters are much lower at higher injection pressure and the increasing injection pressure enhances atomisation of RSO. The trend presented in the figure is consistent with the similar publications of Lacoste et al. [18] and Araneo and Coghe [1].

Finally, the effect of ambient density (pressure) and injection pressure on number of validated drops is presented in Figure 5. The validated drops term refers to the percentage of validated drops within a studied population. The validated drops were considered as those of meeting velocity (one component) and sphericity validation limits. It has been recognised that attaining measurements in the dense spray environment was difficult. Therefore, a study of the ambient density effect is naturally interesting. As it can be seen from Figure 5a denser ambient conditions lead to linear validation decreases almost in a linear manner. This easily predicted effect is associated with increasing density of spray due to higher shear forces stripping off the spray. One can notice that the effect is more noticeable for the higher oil temperature, which weakens oil viscosity, density and surface tension. The presented data were collected for the injection pressure of 131.25 MPa , although the same trend was found for the whole range of injection pressures.

Figure 5b presents the effect of injection pressure on the number of validated drops for two different ambient conditions. As the injection pressure increase, validation decreases by almost 20% and 50% for 15 kg/m^3 and 60 kg/m^3 respectively. It is apparent that higher injection pressure creates more dense spray, therefore the similar trend for both curves can be observed. Although, the lower ambient density enhances higher drops validation already observed in Figure 5a.



Rys. 4. Wpływ ciśnienia wtrysku na średnią średnicę kropeł dla RSO w temperaturze 60°C i w ośrodku o gęstości: a) 15 kg/m^3 , b) 60 kg/m^3
 Fig. 4. Effect of injection pressure on RSO at 60°C and the ambient density of: a) 15 kg/m^3 , b) 60 kg/m^3



Rys. 5. Wpływ gęstości ośrodka (a) i ciśnienia wtrysku (b) na uwzględnianą liczbę kropeł oleju rzepakowego

Fig. 5. Effect of ambient density (a) and injection pressure (b) on validated numbers of rapeseed drops

ciśnienie wtrysku tworzy gęstszy aerozol, stąd podobną tendencję obserwuje się w przypadku obu krzywych. Niższa gęstość ośrodka umożliwia zwiększenie liczby uwzględnianych kropeł, co widać z rysunku 5a.

6. Wnioski

Na podstawie wyników przedstawionych badań sformułowano następujące wnioski:

1. W badaniach wykorzystano rozpylony pod wysokim ciśnieniem olej rzepakowy z systemu *common rail*, który był analizowany przy pomocy aparatury do badań metodą fazowej anemometrii Dopplera. W cyklu testów stosowano różne ciśnienia wtrysku i ośrodka, do którego wtrysk następował.
2. Olej rzepakowy cechujący się dużą gęstością w istotnym stopniu wpływa na jakość pomiarów mających ustalić wymiary kropeł i wykazuje podobne problemy pomiarowe, jakie obserwowano w przypadku gęstego oleju napędowego. Ostateczna pomyślna rejestracja danych poprzedzona była podgrzaniem oleju rzepakowego i dokładną regulacją aparatury laserowej. Można zauważyć, że wzrost napięcia fotonowielacza umożliwia w miarę stabilne określenie wymiarów kropeł. Najodpowiedniejszym dla prowadzonych badań napięciem PMT było 1000 V.
3. Aby oddzielić „krople satelity” i poprawić wiarygodność pomiarów zastosowano filtr statystyczny. Rozkład wymiarów kropeł wykazał, że zwiększając ciśnienie ośrodka uzyskuje się zdeformowany rozkład normalny, w którym przeważają małe krople. Takie zjawisko można tłumaczyć wpływem oporu aerodynamicznego ośrodka wywołującego rozpad kropeł i odpadanie ligandów.
4. Zarówno wzrost ciśnienia wtrysku, jak i ciśnienia ośrodka powodują zmniejszenie średniej średnicy kropli. Jednak taki wzrost parametrów okupiony jest zmniejszeniem liczby uwzględnianych kropeł.

Podziękowania

Autorzy dziękują firmom EPSRC i Dantec za dostarczenie układu do pomiaru metodą PDA i życzliwą pomoc. Specjalne podziękowania są kierowane do firmy Elsbett GmbH i prof. Markusa Brautscha za udostępnienie stanowiska wyposażonego w system *common rail*.

6. Conclusion

From the results of this research, the conclusions are briefly summarised as follows:

1. Rapeseed oil high pressure sprays produced in a common-rail injection system were tested using a PDA instrument. Various injection and ambient pressures were applied throughout the experiments.
2. High density of rapeseed oil significantly affects the quality of sizing measurements, and exhibits the similar set of experimental problems which have been found for the dense Diesel spray. Rapeseed oil pre-heating and fine adjustment of the laser instrument was applied prior to the final and successful data acquisition. It can be seen that the increasing of the PMT voltage leads to relatively stable droplet diameter. The sensitivity of the PMT at 1,000 V was found as the most appropriate in the performed tests.
3. A statistical filter was established to separate “satellite drops” and to improve data reliability. The droplet size distributions revealed that the increasing ambient pressure results in a deformed Gaussian distribution having larger number of small droplets. The observation is caused by an effect of the aerodynamic resistance of the ambient gas enhancing the secondary break-up of drops as well as breaking up ligands.
4. That increasing injection and ambient pressures lower the mean droplet diameter. However, higher ambient conditions trade off on decreasing droplet validation.

Acknowledgements

Authors thank EPSRC and Dantec UK for the PDA system and kind assistance. Special thanks need to be addressed to Elsbett Company GmbH and Prof. Markus Brautsch for the CR injection stand.

Artykuł recenzowany

Literatura/Bibliography

- [1] Araneo L., Coghe A.: Effect of injection conditions on penetration and drop size of HCCI diesel sprays. In Thiesel 2002 Conference on Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines, 2002.
- [2] Araneo L., Tropea C.: Improving phase Doppler measurements in a Diesel spray. SAE, 2000.
- [3] Bae C., Kang J., Lee H.: Diesel spray development from vco nozzle with common-rail. 2001 Fall Technical Conference, 2001.
- [4] Bialkowski M. T., Pekdemir T., Brautsch M., Towers D., Elsbett G.: Experimental analysis of rapeseed oil atomisation characteristics. In Proceedings of Photon04, 6-9 September 2004, Glasgow, 2004.
- [5] Bialkowski M. T., Pekdemir T., Reuben R., Brautsch M., Elsbett G., Towers D.: Effect of fuel temperature and ambient pressure on a common rail rapeseed oil spray. In Proceedings of 30th International Scientific Conference on Internal Combustion Engines, KONES2004, 2004.
- [6] Dyne van D. L., Weber J. A., Braschler C. H.: Macroeconomic effects of a community-based biodiesel production system. Bioresource Technology, 1996.
- [7] Ficarella A., Laforgia D., Starace G., Damiani V.: Experimental investigation of the sprays of an axi-symmetric nozzle of a common-rail high pressure electro-injector. SAE, 1997.
- [8] Hardalupas Y., Horender S.: Phase Doppler anemometer for instantaneous measurements of droplet concentration. In 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2000.
- [9] Hardalupas Y., Taylor A. P., A.M.K.P., Whitelaw J. H.: Characteristics of the spray from a diesel injector. International Journal of Multiphase Flow, 1992.
- [10] He Y., Bao Y D.: Study on rapeseed oil as alternative fuel for a single-cylinder diesel engine. Renewable Energy, 2003.
- [11] Hemmerlein N., Korte V., Richter H.: Performance, exhaust emissions and durability of modern diesel engines running on rapeseed oil. SAE Transactions, 1991.
- [12] Hosoya H., Obokata T.: Effect of nozzle configuration on characteristics of steady-state diesel spray. SAE Special Publication-Diesel Combustion Processes, 1993.
- [13] Jimenez J. E., Mendez C., Castro F., Tinaut F. V., Gimenez B.: Experimental comparison between conventional and bio-derived fuel sprays. SAE, 2001.
- [14] Kashdan J. T., Shrimpton J. S., Booth H. J., Whybrew A.: Assessment of particle characterisation via phase Doppler anemometry and automated particle image analysis techniques.
- [15] Kennaird D. A., Crua C., Lacoste J., Heikal M. R., Gold M. R., Jackson N. S.: In-cylinder penetration and break-up of diesel sprays using a common-rail injection system. SAE, 2002.
- [16] Koo J. H., Hong S. T., Shakal J. S., Goto S.: Influence of fuel injector nozzle geometry on internal flow characteristics. SAE 1997.
- [17] Kurachi K., Serizawa T., Wada K., Kato S., Ito H.: Investigation of measurement of diesel spray breakup length by using doppler signals. SAE, 2001.
- [18] Lacoste J., Crua C., Heikal M., Kennaird D.: PDA characterisation of dense diesel sprays using a common-rail injection system. SAE, 2003.
- [19] Lacoste J., Kennaird D., Begg S., Heikal M. R.: Phase doppler anemometry measurements of a diesel spray. In The Total Vehicle Technology (TVT), Institution of Mechanical Engineers Automobile Division Southern Centre, 2002.
- [20] Laguitton O., Gold M., Kennaird D., Crua C., Lacoste J., Heikal M.: Spray development and combustion characteristics for common-rail diesel injection systems. In IMechE Conference on Fuel Injection Systems, 2002.
- [21] Lee C. S., Reitz R. D.: Effect of liquid properties on the breakup mechanism of highspeed liquid drops. Atomisation and Spray, 2001.
- [22] Lee K., Reitz R.: Investigation of spray characteristics from a low-pressure common rail injector for use in homogenous charge compression ignition engine. Measurement Science and Technology, 2004.
- [23] McDonnell K. P., Ward S. M., McNulty P. B., Howard-Hildige R.: Results of engine and vehicle testing of semirefined rapeseed oil. Transactions of the ASAE, 2000.
- [24] Nwafor O. M.: Effect of varying fuel inlet temperature on the performance of vegetable oil in a diesel engine under part-load conditions. International Journal of Ambient Energy, 1999.
- [25] O'Rourke P. J.: Collective drop effects on vaporising liquid sprays. PhD thesis, Princeton University, 1981.
- [26] Perkins L. A., Peterson C. L., Auld D. L.: Durability testing of transesterified winter rape oil (brassica napus l.) as fuel in small bore, multi-cylinder, dl, cl engines. SAE Technical Paper Series, International Off-Highway and Powerplant Congress and Exposition, 1991.
- [27] Peterson C. L., Auld D. L., Korus R. A.: Winter rape oil fuel for diesel engines: recovery and utilisation. Journal of JAOS, 198.
- [28] Vellguth G.: Performance of plant oils and their monoesters as fuels for diesel engines. SAE, 1983.
- [29] Wigley G., Heath J., Pitcher G., Whybrew A.: Experimental analysis of the response of a PDA system to a partially atomized spray. In 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, 2000.
- [30] Ziejewski M., Goettler H. J.: Design modifications for durability improvements of diesel engines operating on plant oil fuels. Int. Off-Highway & Powerplant Congress & Exposition SAE, 1992.

* Michal T. Bialkowski – Szkoła Inżynierii i Fizyki, Uniwersytet Heriot-Watt, Edynburg, Szkocja.

Mr Michal T. Bialkowski – School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland.

T. Pekdemir – Szkoła Inżynierii i Fizyki, Uniwersytet Heriot-Watt, Edynburg, Szkocja.

Mr T. Pekdemir – School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland.

G. Elsbett – ELSBETT Technologie GmbH, Thalmassing, Niemcy.

Mr G. Elsbett – ELSBETT Technologie GmbH, Thalmassing, Germany.

M. Brautsch – Wydział Ochrony Środowiska, University of Applied Sciences, Amberg-Weiden, Niemcy.

Mr M. Brautsch – Environmental Engineering Department, University of Applied Sciences, Amberg-Weiden, Germany.

D. P. Towers – Szkoła Inżynierii i Fizyki, Uniwersytet Heriot-Watt, Edynburg, Szkocja.

Mr D. P. Towers – School of Engineering and Physical Sciences, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland.