

Investigation of fuel film formation and its disappearance during the injection of the petrol and biofuel E85

Abstract: The paper presents a study of visualization of injection by petrol and biofuel E85 of 70% of ethanol and 30% of petrol into a transparent intake duct of an internal combustion engine. The Holden C20LE engine powered with a system of sequential fuel injection into an intake manifold and a camera to record high-frequency processes were used for the research. The methodology of determining the percentage coverage of fuel in an intake duct and the results obtained are discussed in the paper. Done for several operating points for fuelling by petrol and E85, the research demonstrates significant discrepancies in the behaviour of fuel jet and fuel film formation according to the type of fuel injected.

Key words: ethanol, E85, fuel film

Badania procesu powstawania i zanikania filmu paliwowego podczas wtrysku biopaliwa E85 i benzyny

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania wizualizacyjne wtrysku benzyny oraz biopaliwa E85 zawierającego 70% etanolu i 30% benzyny do przezroczystego przewodu dolotowego silnika spalinowego. Do badań użyto silnika C20LE Holden zasilanego układem sekwencyjnego wtrysku paliwa do kolektora dolotowego oraz kamerę do rejestracji procesów szybkozmiennych. Omówiono metodykę wyznaczania procentowego pokrycia paliwa w przewodzie dolotowym oraz przeprowadzono analizę otrzymanych wyników. Zamieszczono wyniki z badań dla kilku punktów pracy silnika przy zasilaniu benzyną oraz bioetanolem E85. Wykazano istnienie znaczących różnic w zachowaniu strugi oraz powstawaniu filmu paliwowego w zależności od wtryskiwanego paliwa.

Słowa kluczowe: etanol, E85, film paliwowy

1. Wstęp

W ostatnim czasie obserwuje się znaczący wzrost zainteresowania zastępczymi i alternatywnymi paliwami do pojazdów samochodowych. Na stacjach benzynowych w ostatnim czasie pojawiło się nowe paliwo występujące pod nazwą Bio85. Paliwo to zawiera od 70-85% etanolu i stanowi alternatywę dla paliw ropopochodnych. Zastosowanie paliw alkoholowych do zasilania pojazdów samochodowych może przyczynić się między innymi do zmniejszenia wykorzystania zasobów naturalnych (nowe źródło energii) oraz zmniejszenia zagrożenia środowiska (mniejsza emisja substancji szkodliwych). Zastosowanie etanolu do zasilania pojazdów wymaga jednak przystosowania układu wtryskowego oraz układu sterowania [5]. Na polskim rynku są już dostępne pojazdy FFV (Flexi Fuel Vehicles) przystosowane przez producentów do zasilania tego typu paliwem.

Po wtrysku paliwa w układzie dolotowym silnika powstaje szkodliwe zjawisko osadzania się na ściankach części wtryskiwanego paliwa. Paliwo tworzy tam tzw. film paliwowy stopniowo parujący i ściekający do cylindra ze znacznym opóźnieniem [2, 3, 6, 7]. W przypadku zastosowania paliwa o innych właściwościach niż benzyna mamy do czynienia ze zmianą wielkości i szybkości parowa-

nia filmu paliwowego. Zjawisko to musi być kompensowane w odpowiedni sposób (wyznaczonymi współczynnikami) w algorytmie sterującym. W celu identyfikacji procesu tworzenia strugi paliwa oraz powstawania filmu paliwowego na ściankach układu dolotowego silnika dla benzyny oraz E85 przeprowadzono badania wizualizacyjne, podczas których wykorzystano kamerę do rejestracji procesów szybkozmiennych.

Metody optyczne w badaniach silników spalinowych stosowane są już od kilkunastu lat i obserwowany jest ich ciągły rozwój oraz coraz szersze zastosowanie [1, 2, 4]. Istnieje kilka metod optycznych wykorzystywanych w badaniach silnikowych, które najogólniej można podzielić na dwie grupy: metody fotograficzne i laserowe. W metodzie fotograficznej do rejestracji obrazu wykorzystywane są kamery do wykonywania szybkich zdjęć lub technika wideo. Metoda ta charakteryzuje się różnym stopniem skomplikowania w zależności od miejsca rejestracji obrazu. W przypadku zastosowania kamery do rejestracji szybkich zdjęć (kilkadziesiąt tysięcy klatek na sekundę) należy liczyć się z utrudnieniem, jakim jest krótki czas rejestracji, który zależy od ilości klatek na sekundę, długości filmu oraz pojemności kart pamięci. Jakość używanego materiału oraz ilość zawartych na nim detali zależy przede wszystkim od czułości prze-

twornika pomiarowego CCD. Zastosowanie takich kamer w zależności od szybkości daje możliwość rejestrowania różnych zjawisk takich jak formowanie się strugi paliwa, rejestracja odparowanej i nieodparowanej strugi paliwa czy efekt rozpadania kropeł. Rejestracja wtrysku paliwa możliwa jest dzięki zastosowaniu ultra szybkiej fotografii, gdzie ilość rejestrowanych klatek na sekundę dochodzi do 1,25 miliona.

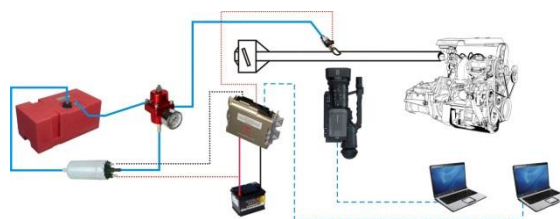
Taką metodę wykorzystali Milton, Behnia i El-lerman [4], którzy przeprowadzili badania mające na celu określenie stopnia osiadania i atomizacji paliwa przepływającego przez zawór dolotowy silnika z pośrednim wtryskiem benzyny. Przepływ mieszanki paliwowo-powietrznej w przewodzie dolotowym rejestrowany był za pomocą kamery do rejestracji procesów szybkozmiennych. Zaobserwowano formowanie się filmu paliwowego na ściankach przewodu dolotowego i zaworów. Stwierdzono również osiadanie paliwa na ściankach tulei cylindrowych oraz wewnątrz komory spalania. Duże nagromadzenie nieodparowanego paliwa na ściankach cylindrów ma miejsce szczególnie podczas rozruchu silnika i w fazie rozgrzewania. Następnie przeprowadzone badania symulacyjne w programie FLUENT dostarczyły wyników porównywalnych z badaniami eksperymentalnymi, co pokazuje dużą przydatność oraz miarodajność zastosowanej metody.

W artykule przedstawiono wyniki analizy badań stanowiskowych zjawiska powstawiania filmu paliwowego w układzie dolotowym silnika spalinowego zasilanym alkoholem etylowym oraz benzyną.

2. System do obserwacji i rejestracji filmu paliwowego

System przeznaczony do obserwacji i rejestracji wtrysku benzyny i biopaliwa E85 zamontowano na silniku spalinowym Holden C20LE. W tym celu zdemontowano poszczególne elementy układu dolotowego łącznie z przepustnicą. W miejscu montażu przepustnicy zamontowano adapter łączący kolektor dolotowy z przezroczystym przewodem wykonanym z tworzywa polimerowego o średnicy wewnętrznej 0,036 m odpowiadającej przewodowi dolotowemu badanego silnika. W zamontowanym przewodzie dolotowym umieszczono wtryskiwacz paliwa oraz przepustnicę do regulacji przepływu powietrza w silniku. Zbudowano układ paliwowy składający się z pompy paliwa, zbiornika na paliwo, regulatora ciśnienia oraz przewodów paliwowych. Silnik napędzany był za pomocą hamulca elektrycznego. Sterowanie czasem wtrysku paliwa oraz pracą pompy paliwowej realizowane było za pośrednictwem sterownika laboratoryjnego oraz współpracującego z nim programu komputerowego (rys. 1). Widok przewodu dolotowego zastosowanego podczas badań przedstawiono na fotografii 1.

Do rejestracji wtrysku paliwa do przewodu dolotowego wykorzystano kamerę do rejestracji procesów szybkozmiennych Phantom v9.1 (fot. 2).



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

Fig. 1. Schematic of the test stand.



Fot. 1. Widok przewodu dolotowego na stanowisku badawczym.

Photo 1. Inlet manifold at the test stand.



Fot. 2. Widok kamery do rejestracji procesów szybkozmiennych Phantom v9.1. [8]

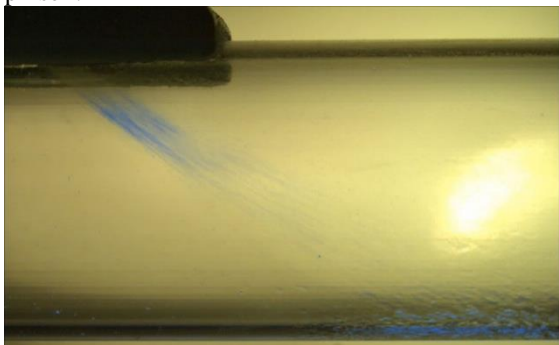
Photo 2. Phantom v9.1. camera to record high-frequency processes. [8]

3. System do przetwarzania zarejestrowanych obrazów

W celu wyeksponowania paliwa na materiale wideo wykorzystano oprogramowanie Adobe After Effects. Dla każdej klatki, zdjęcia z wyeksponowanym paliwem (rys. 2) została wygenerowana maska monochromatyczna (rys. 3), która przedstawia na czarnym tle różnicę pomiędzy wzorcowym zdjęciem bez paliwa, a tym aktualnie rozważanym.

Im większa różnica na zdjęciach (wzorcowym i aktualnie rozważanym) tym jaśniejszy jest kolor

biały na masce. Na zdjęciach monochromatycznych kolor biały występuje także w odcieniach szarości. Do określenia procentowej zawartości paliwa na zdjęciu monochromatycznym należy także wziąć pod uwagę piksele w odcieniach szarości, przy czym piksele jaśniejsze powinny być ważniejsze przy liczeniu od pikseli ciemniejszych. W tym celu należy zastosować funkcję wagową przy liczeniu pikseli.



Rys. 2. Zdjęcie przewodu dolotowego z wyeksponowanym paliwem.

Fig. 2. Photo of the intake manifold with fuel marked.



Rys. 3. Maska monochromatyczna zdjęcia z wyeksponowanym paliwem.

Fig. 3. Monochrome version of the photo with fuel marked.

W wyniku przeprowadzonej analizy napotkano pewne utrudnienia. Przewód dolotowy na filmie w pewnych momentach unosi się i wraca do poprzedniego stanu kilkakrotnie. Zdarzenie to w pewnym stopniu generuje szumy na zdjęciu i powoduje, iż nie jest możliwe dokładne wyliczenie procentowej ilości paliwa na niektórych zdjęciach. Dla niektórych materiałów wideo generowane maski nie osiągają koloru białego, a jedynie odcień szarości np. kolor (150,150,150) w wyniku czego dla dokładniejszego wyznaczenia procentowego pokrycia paliwa na zdjęciu do dalszej analizy wybrano maksymalne wartości odcienia szarości koloru. Wykorzystano następujące funkcje wagowe:

a) Funkcja pierwiastkowa:

$$SQRT_{MAX}(x) = \sqrt{\frac{x}{W_{MAX}}} \quad (1)$$

b) Funkcja liniowa:

$$LIN_{MAX}(x) = \frac{x}{W_{MAX}} \quad (2)$$

c) Funkcja kwadratowa:

$$KW_{MAX}(x) = \left(\frac{x}{W_{MAX}}\right)^2 \quad (3)$$

gdzie W_{MAX} jest maksymalnym numerem odcienia szarości koloru (W_{MAX} , W_{MAX} , W_{MAX}), jaki wystąpił we wszystkich maskach danego materiału wideo.

Pierwsza funkcja, waga pierwiastkowa, będzie zawierać największe wartości, ponieważ jej wypukłość do góry sprawia, że przykłada większą wagę dla ciemniejszych odcieni szarości, dlatego też funkcja ta jest słabo odporna na szumy na zdjęciu. Co w rezultacie może w przypadku niektórych zdjęć zaszumionych przyjmować za wysoki współczynnik procentowy.

Wagowa funkcja kwadratowa, ponieważ jest funkcją wypukłą w dół w bardzo niewielkim stopniu bierze pod uwagę piksele o ciemnym odcieniu. W tym przypadku szumy na zdjęciu są eliminowane w dużym stopniu przy zliczaniu pikseli, ale także ciemniejsze odcienie paliwa w mniejszym stopniu są brane pod uwagę.

Liniowa funkcja wagowa jest funkcją pośrednią pomiędzy pierwszą i trzecią funkcją wagową. Jest też odporna na zaszumione zdjęcia.

W celu obliczenia procentowego pokrycia paliwa na zdjęciu w pierwszej kolejności przy pomocy funkcji "ReadImage" programu Adobe After Effects wczytujemy maskę monochromatyczną, następnie konwertujemy ją do formatu monochromatycznego zdjęcia używając funkcji "RGB2Gray". Tak przygotowane zdjęcie trafia jako parametr do funkcji tworzącej histogram w wyniku czego powstaje wektor 256 elementowy, którego wartości informują o liczbie pikseli o odpowiednich odcieniach szarości na danej masce, np. wartość wektor[1] jest liczbą pikseli w kolorze (0,0,0), wektor[k] liczbą pikseli w kolorze (k-1,k-1,k-1), wektor[256] liczbą pikseli w kolorze (255,255,255). Współczynnik procentowy ilości paliwa na zdjęciu jest obliczany przy pomocy ilorazu sum:

$$Wp = \frac{\sum_{k=0}^{255} \text{wektor}[k+1] f_w(k)}{\sum_{k=0}^{255} \text{wektor}[k+1]}$$

gdzie f_w jest funkcją wagową.

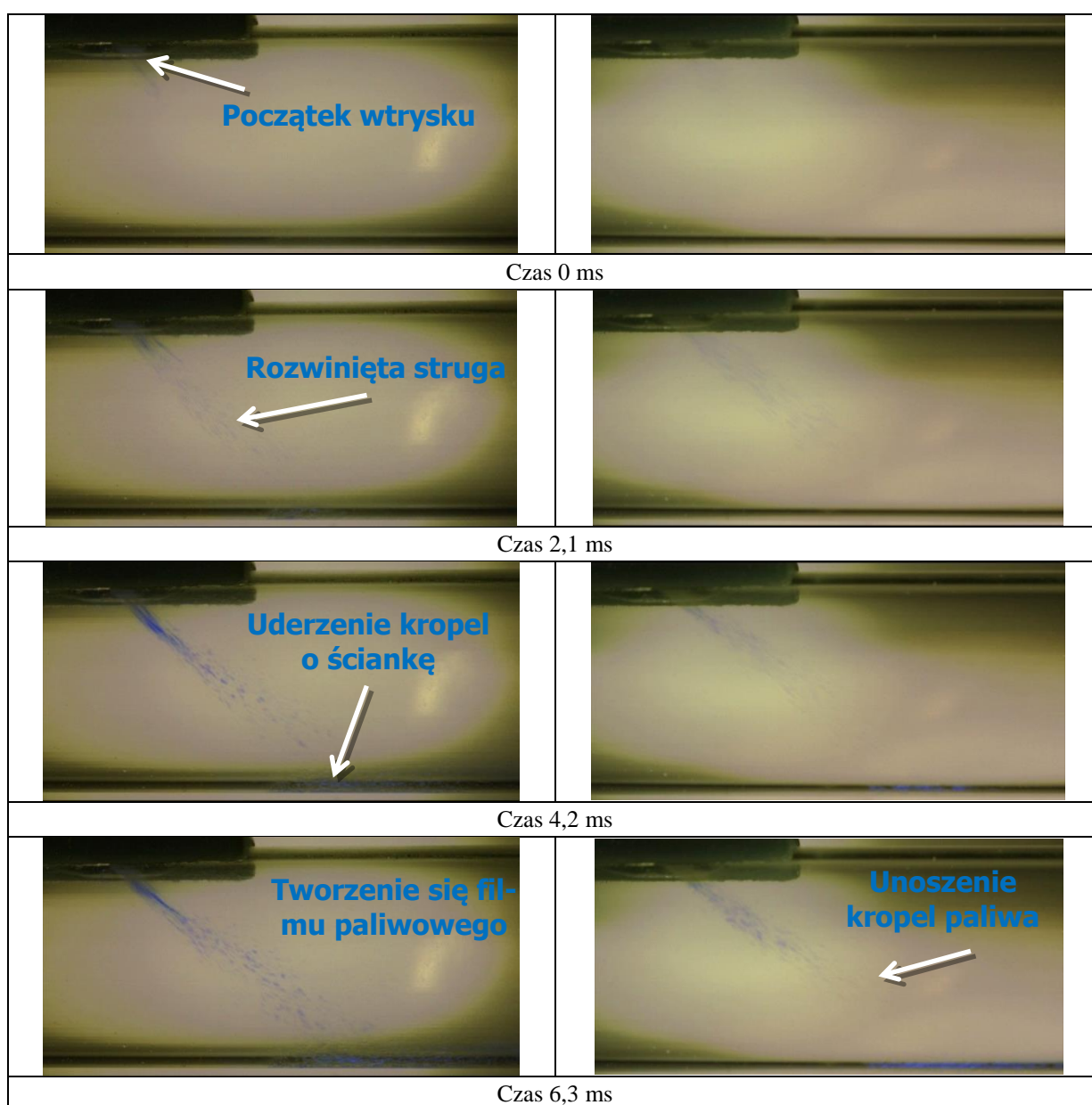
Do dalszych analiz wybrano liniową funkcję wagową. Udział graficzny paliwa w zarejestrowanym obrazie fragmentu układu dolotowego oznaczono jako W .

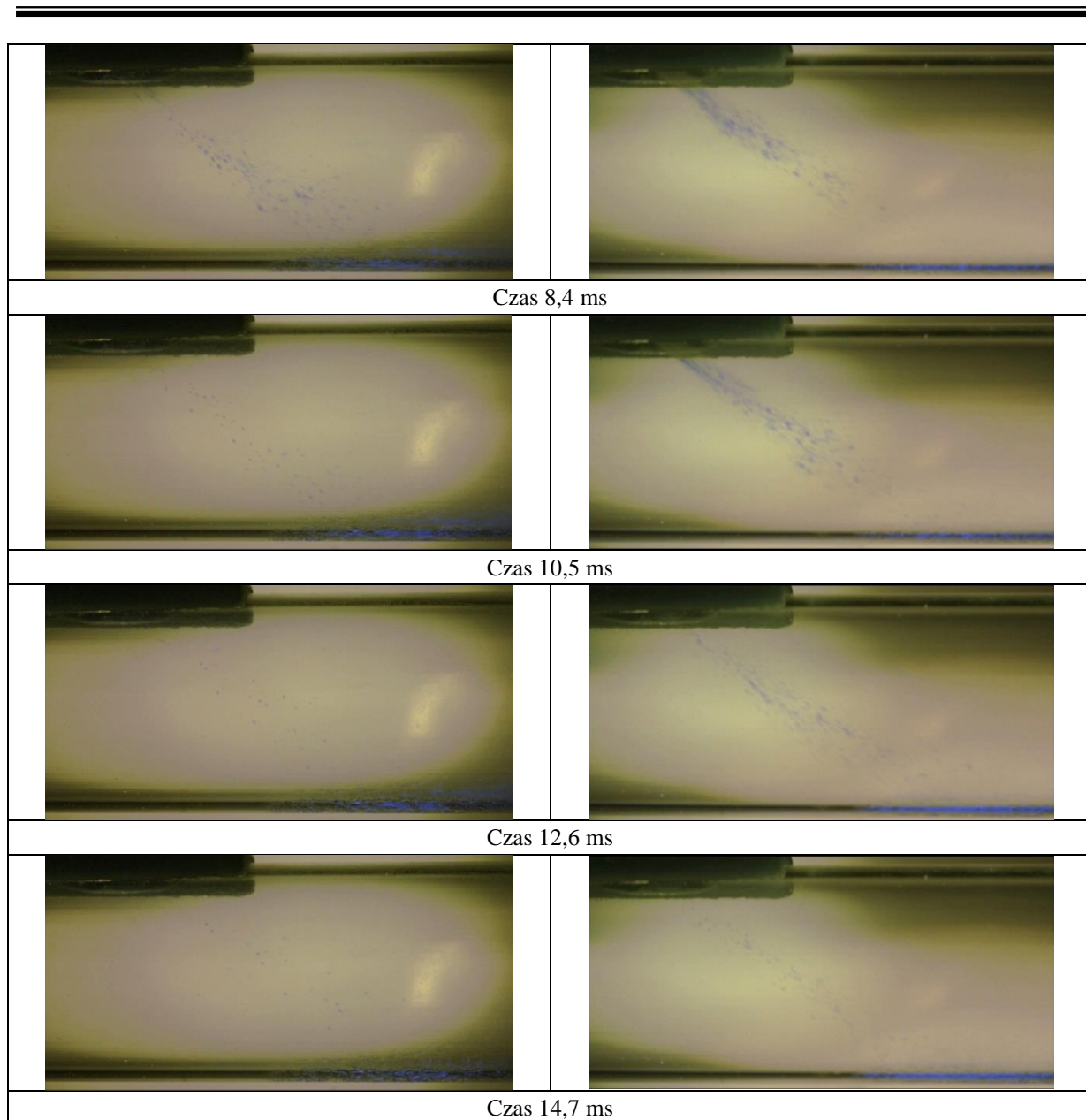
4. Wyniki badań wizualizacyjnych

Pomiary wykonano dla 4 różnych punktów pomiarowych. Prędkość obrotowa silnika wynosiła $n = 1500 - 3900$ obr/min, natomiast ciśnienie w układzie dolotowym $p_d = 45$ kPa i $p_d = 85$ kPa. Ciśnienie wtrysku paliwa wynosiło $0,3$ MPa, natomiast temperatura powietrza w kolektorze dolotowym wynosiła 20 ± 3 °C. Badania wykonano dla niezmiennych warunków otoczenia. Wyznaczono czasy otwarcia wtryskiwacza paliwa dla badanych punktów pomiarowych tak aby współczynnik nadmiaru powietrza $\lambda=1$. Podczas eksperymentu w każdym z punktów pomiarowych wykonano od 7 do 10 kolejnych wtrysków paliwa do suchego przewodu dolotowego. Utrzymywano na stałym

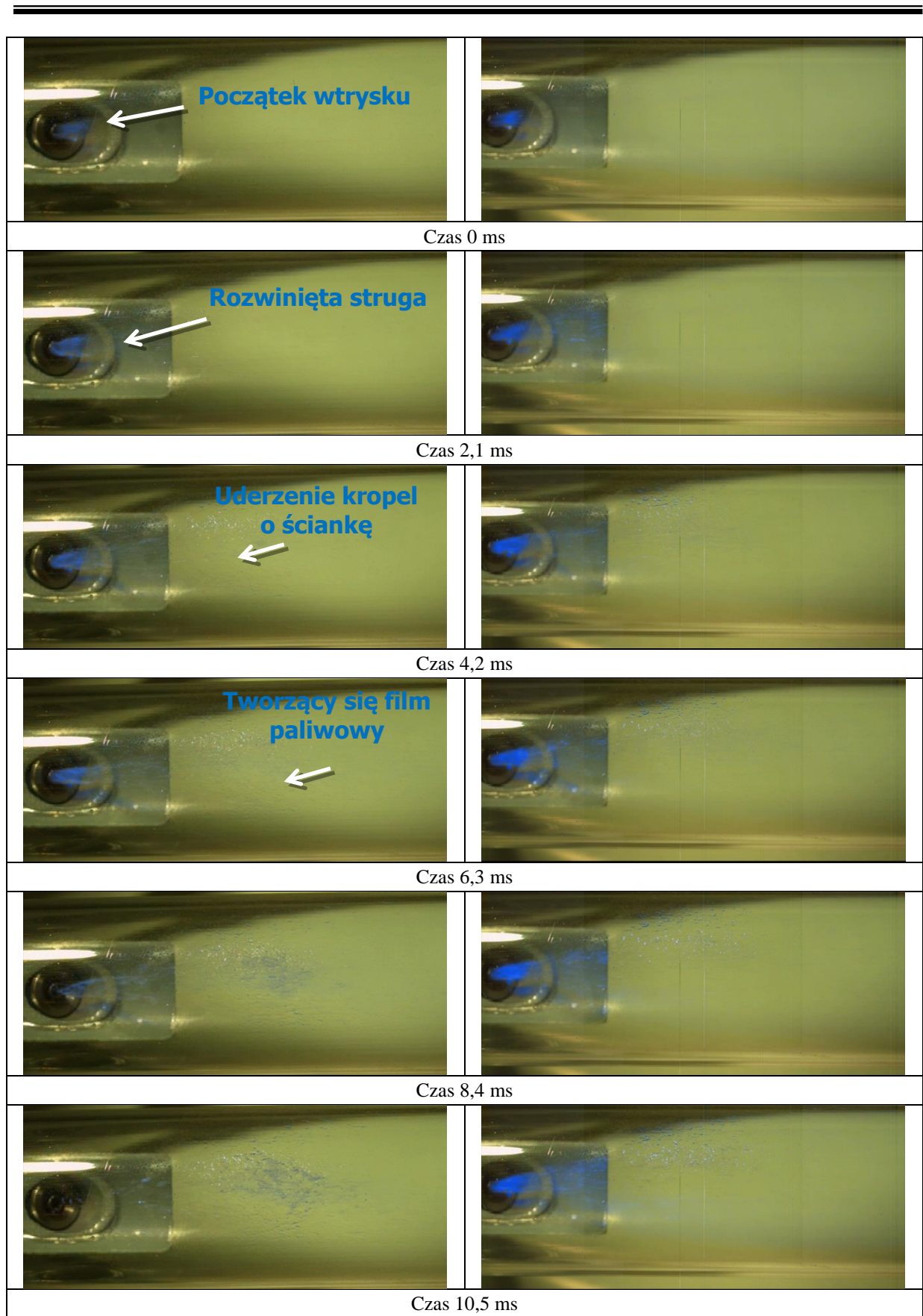
poziomie ciśnienie w układzie dolotowym p_d oraz czas wtrysku paliwa t_{wtr} i jednocześnie rejestrowano wtrysk paliwa oraz powstawanie filmu paliwowego w przewodzie dolotowym. Badania przeprowadzono dla benzyny silnikowej Pb95 oraz bioetanolu E85.

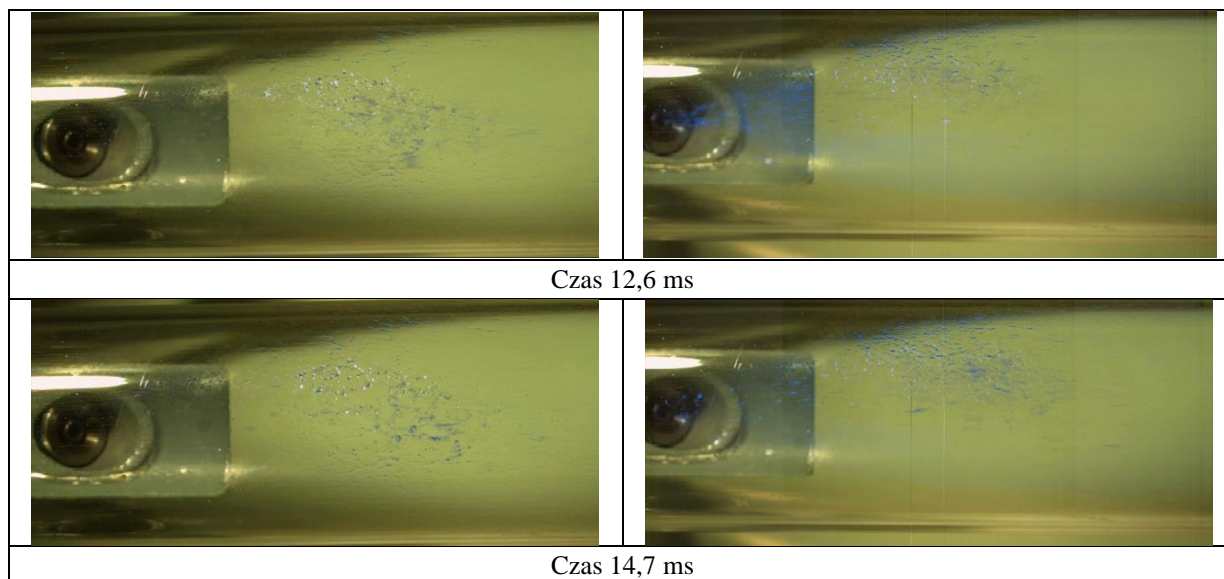
W wyniku przeprowadzonych badań wizualizacyjnych uzyskano graficzny przebieg wtrysku benzyny Pb95 i biopaliwa E85 do przewodu dolotowego. Przedstawiono wybrane wyniki dla jednego punktu badawczego. Na rysunkach 4 – 5 przedstawiono wizualizację boczną i dolną wtrysku benzyny Pb95 i biopaliwa E85 dla prędkości obrotowej $n = 1500$ obr/min i ciśnienia w przewodzie dolotowym $p_d = 65$ kPa.





Rys. 4. Wizualizacja boczna wtrysku benzyny Pb95 (z lewej) i biopaliwa E85 (z prawej) dla $n = 1500$ obr/min i $p_d = 65$ kPa
Fig. 4. Side visualization of injection by Pb95 (left) and biofuel E85 (right) for $n = 1500$ rpm and $p_d = 65$ kPa

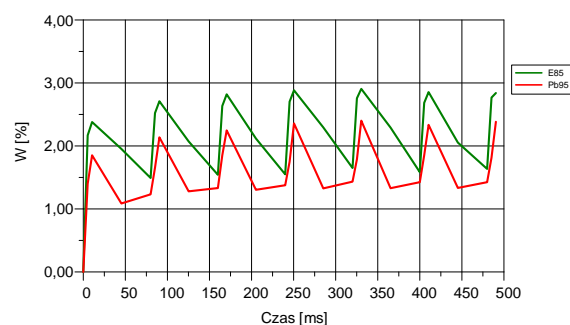




Rys. 5. Wizualizacja dolna wtrysku benzyny Pb95 (z lewej) i biopaliwa E85 (z prawej) dla $n = 1500$ obr/min i $p_d = 65$ kPa.

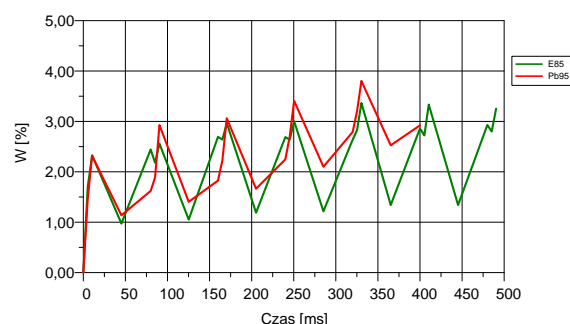
Fig. 5. Bottom visualization of injection by Pb95 (left) and biofuel E85 (right) for $n = 1500$ rpm and $p_d = 65$ kPa

Przebiegi czasowe graficznego udziału paliwa W dla obu badanych paliw w danym punkcie badawczym przedstawiono na rysunkach 6 – 7.



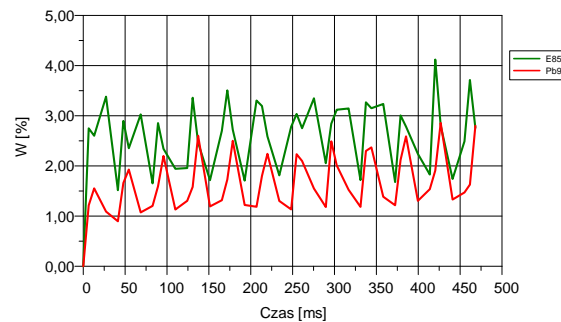
Rys. 6. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W obu badanych paliw dla $n = 1500$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja boczna).

Fig. 6. Time course for the visualized share of fuel W of both fuels under study for $n = 1500$ rpm, $p_d = 65$ kPa (side visualization)



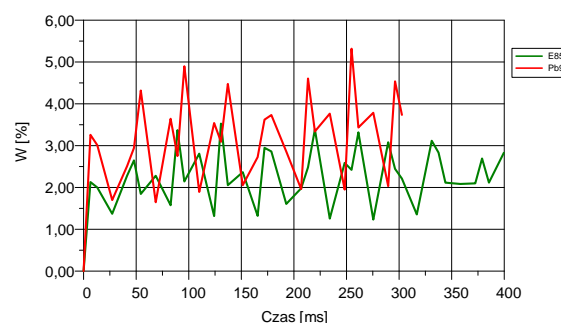
Rys. 7. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W obu badanych paliw dla $n = 1500$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja dolna)

Fig. 7. Time course for the visualized share of fuel W of both fuels under study for $n = 1500$ rpm, $p_d = 65$ kPa (bottom visualization)



Rys. 8. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W obu badanych paliw dla $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja boczna)

Fig. 8. Time course for the visualized share of fuel W of both fuels under study for $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (side visualization)



Rys. 9. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W obu badanych paliw dla $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja dolna)

Fig. 9. Time course for the visualized share of fuel W of both fuels under study for $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (bottom visualization)

Analiza przebiegów czasowych graficznego udziału paliwa W dla obydwu badanych paliw

w przypadku wizualizacji bocznej pozwala stwierdzić, że jest on bardziej wrażliwy na obecność alkoholu w paliwie. Wynika to z przyjętej metody badawczej, dla której obliczano obecność paliwa w postaci powierzchniowej, bez możliwości pomiaru głębokości kolejnych warstw filmu paliwowego. W przypadku wizualizacji bocznej wtrysku E85 zauważyć można, że wielkość filmu paliwa dla wtrysku benzyny jest mniejsza aniżeli wielkość filmu przy wtrysku paliwa alkoholowego. Jednocześnie struga dla E85 jest bardziej rozproszona niż w przypadku wtrysku benzyny. Udział czasowy graficznego udziału paliwa W jest mniejszy dla benzyny zaś większy dla etanolu. Amplituda zmian graficznego udziału paliwa W jest większa dla etanolu w stosunku do benzyny, co świadczy o wpływie paliwa na stopień zmian zarówno strugi jak i wielkości filmu paliwowego.

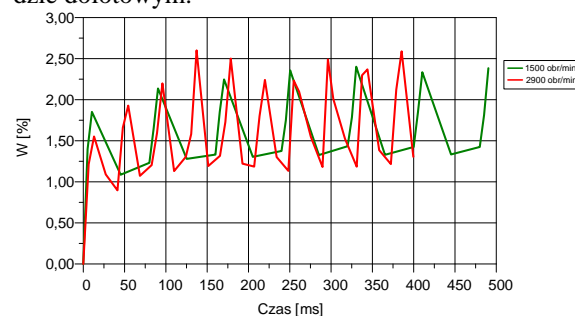
5. Analiza wyników badań

Rysunki 10 do 13 ujawniają strukturę filmu paliwowego oraz strukturę strugi wtryskiwanej z wtryskiwacza. Analiza rysunków dowodzi, że widoczne są krople zarówno w strudze jak i w filmie paliwowym. Rysunki wyraźnie pokazują, że struktura filmu paliwowego zawiera zgromadzenia, zagęszczenia kropeł objawiające się ciemniejszym kolorem jak i ich rozrzedzenia. Ta urozmaicona struktura filmu, nie będąc jednolitą i stałą grubością, pokazuje wpływ sił aerodynamicznych powietrza, które rozrywają tworzący się film paliwowy. Ponadto zróżnicowana struktura graficzna filmu paliwowego jest konsekwencją rozpadu strugi na krople i uderzenia pojedynczych zatamizowanych kropeł o powierzchnię w różnych częściach przewodu dolotowego. Kształt filmu paliwowego przypomina parabolę o owalnym zakończeniu podstawy przesuwaną się wraz z przepływem powietrza w kierunku zaworu dolotowego. Jednocześnie zdjęcia ujawniają strukturę strugi, która po zatamizowaniu rozrywana jest siłami aerodynamicznymi w zależności od prędkości powietrza. Dla małej prędkości powietrza struga mniej zakłócona uderza o ściankę. Zwiększona prędkość przepływu powietrza wywołuje zwiększone unoszenie się kropeł paliwa i ich uderzanie w dalszej części przewodu dolotowego.

Przedstawione fotografie niestety nie obejmują całości filmu paliwowego, który tworzył się na badawczym przewodzie dolotowym. Ujawniony jest jedynie niewielki fragment tego filmu paliwowego. Niemniej jednak prześledzenie wpływu czynników takich jak prędkość obrotowa silnika i skojarzona z tym średnia prędkość przepływu powietrza oraz obecność bądź nieobecność alkoholu etylowego w benzynie pozostawia swój ślad w charakterze rozpadu strugi jak i w charakterze rozkładu filmu paliwowego na powierzchni przewodu dolotowego. Wpływ ten obrazują rysunki

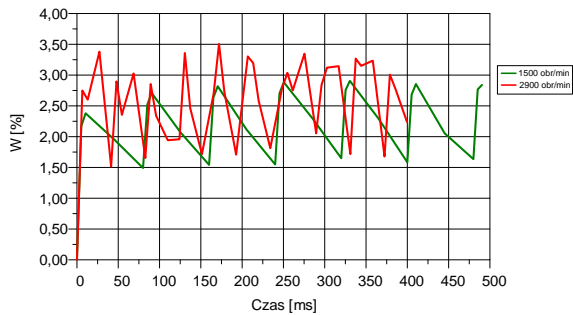
przebiegu czasowego współczynnika W – współczynnika obecności paliwa na fotografiach wykonanych w czasie trwania wtrysku. Analiza przebiegu czasowego współczynnika W dla obydwu badanych paliwa ujawnia ciekawe zależności. Po pierwsze, przebieg czasowy dla wizualizacji bocznej jest dużo bardziej wrażliwy na prędkość przepływu powietrza oraz na obecność alkoholu w paliwie. Jest to konsekwencją przyjętej metody badawczej, dla której obliczano obecność paliwa w postaci powierzchniowej, nie mogąc jednocześnie zmierzyć głębokości kolejnych warstw filmu paliwowego. Tym samym rozkład kształtu powierzchni filmu paliwowego nie był tożsamy z rozkładem grubości tego filmu, co zakłóciło poprawną analizę wrażliwości zjawisk filmu paliwowego na prędkość powietrza czy też prędkość obrotową silnika oraz skład paliw.

Zatem do dalszych analiz dużo bardziej przydatne okazały się rysunki wykonane dla wizualizacji bocznej. Rysunki ujawniają rosnącą powierzchnię filmu paliwa zaś porównanie klętek zawierających strugę, bądź nie zawierających strugi, już po zakończeniu bądź przed rozpoczęciem kolejnego wtrysku, pozwalają na ocenę stopnia rozproszenia strugi po wtrysku. Stopień rozproszenia strugi zaznaczał się poprzez zwiększenie udziału graficznego współczynnika W , co było przyczyną rozwarstwienia strugi pod wpływem sił działających na zatamizowane krople paliwa. Amplituda zmian udziału graficznego współczynnika paliwa W jest zatem miarą stopnia rozproszenia strugi, zaś stopień rozproszenia strugi z całą pewnością oddziałuje na zjawiska filmu paliwowego tworząc film o większej bądź mniejszej gęstości i powierzchni na przewodzie dolotowym.



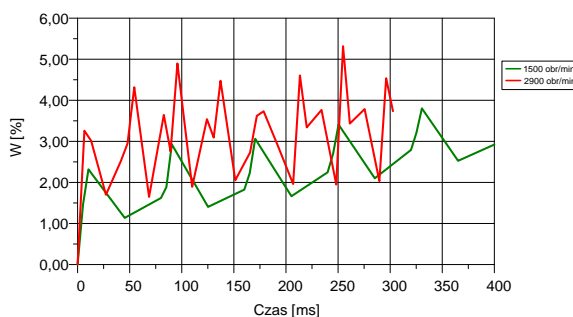
Rys. 10. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W dla benzyny Pb95 dla dwóch prędkości obrotowych $n = 1500$ obr/min i $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja boczna)

Fig. 10. The time course for the visualized share of fuel W for Pb95 for two rotational speeds $n = 1500$ rpm, $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (side visualization)



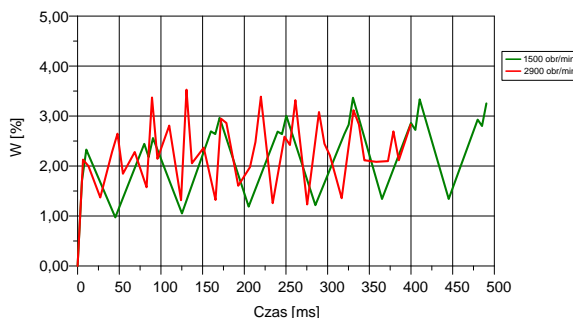
Rys. 11. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W dla benzyny Pb95 dla dwóch prędkości obrotowych $n = 1500$ obr/min i $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja dolna)

Fig. 11. The time course for the visualized share of fuel W for Pb95 for two rotational speeds $n = 1500$ rpm, $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (bottom visualization)



Rys. 12. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W dla biopaliwa E85 dla dwóch prędkości obrotowych $n = 1500$ obr/min i $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja boczna)

Fig. 12. The time course for the visualized share of fuel W for biofuel E85 for two rotational speeds $n = 1500$ rpm, $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (side visualization)



Rys. 13. Przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W dla biopaliwa E85 dla dwóch prędkości obrotowych $n = 1500$ obr/min i $n = 2900$ obr/min, $p_d = 65$ kPa (wizualizacja dolna)

Fig. 13. The time course for the visualized share of fuel W for biofuel E85 for two rotational speeds $n = 1500$ rpm, $n = 2900$ rpm, $p_d = 65$ kPa (bottom visualization)

W celu wykonania dalszych analiz skonstruowano przebiegi czasowe graficznego udziału paliwa W porównując dwa przypadki. W jednym przypadku porównano dwa paliwa, benzynę i biopaliwo dla

kolejnych prędkości obrotowych. W drugim przypadku porównano przebieg czasowy graficznego udziału paliwa W dla jednego paliwa ale dla dwóch różniących się prędkości obrotowych z wizualizacji bocznej. Wykonane rysunki pozwalają na sformułowanie kilku spostrzeżeń. Po pierwsze rysunek 10 pokazuje, że grubość, czy też powierzchnia boczna filmu paliwowego, jest nieznacznie większa dla prędkości 2900 obr/min, niż dla prędkości 1500 obr/min w przypadku wtrysku benzyny. Tymczasem dla paliwa zawierającego etanol istnieje różnica w masie filmu paliwowego, dla prędkości 1500 obr/min masa filmu paliwa wydaje się nieco mniejsza w stosunku do prędkości 2900 obr/min, co może świadczyć o istotnym wpływie rodzaju paliwa na przebieg zjawisk dynamicznych tworzących film paliwowy. Ponadto z obydwu rysunków można wywnioskować o stopniu rozproszeniu strugi. W przypadku wtrysku benzyny amplituda zmian graficznego udziału paliwa W jest większa dla większej prędkości obrotowej, zaś mniejsza dla mniejszej prędkości obrotowej, co związane jest z rozproszeniem tej strugi pod wpływem sił aerodynamicznych przepływającego powietrza. Rysunek 12 pokazuje podobną zależność dla paliwa zawierającego alkohol. Również w tym przypadku jest nieco odwrotnie, masa filmu paliwa wydaje się nieco mniejsza dla prędkości 1500 obr/min w stosunku do prędkości 2900 obr/min, co może świadczyć o istotnym wpływie rodzaju paliwa na przebieg zjawisk dynamicznych tworzących film paliwowy. Zaś rysunek 12 pokazuje podobną zależność dla paliwa zawierającego alkohol. Również w tym przypadku amplituda zmian graficznego udziału paliwa W była większa dla większej prędkości obrotowej. Na rysunkach 11 i 13 porównano dwie prędkości obrotowe dla wizualizacji dolnej.

Rysunek 10 ujawnia dwa fakty. Po pierwsze wielkość filmu paliwa dla wtrysku benzyny jest mniejsza aniżeli wielkość graficznego udziału paliwa W dla wtrysku paliwa alkoholowego. Równocześnie struga dla paliwa alkoholowego jest bardziej rozproszona niż dla benzyny w przypadku prędkości 1500 obr/min. Podobnie obserwuje się zależności dla prędkości 2900 obr/min. Również tutaj wielkość filmu paliwa jest większa. Udział czasowy graficznego udziału paliwa W jest mniejszy dla benzyny zaś większy dla biopaliwa. Amplituda zmian graficznego udziału paliwa W jest większa dla etanolu w stosunku do benzyny, co świadczy o wpływie paliwa na stopień zmian zarówno strugi jak i wielkości filmu paliwowego.

Rysunki 10 i 12 pokazują, że zwiększona prędkość obrotowa skutkuje zmniejszeniem się filmu w przypadku wtrysku benzyny i zwiększeniem się powierzchni wtrysku paliwa zawierającego alkohol. Może to świadczyć o istotnej zmianie procesu tworzenia filmu paliwa po dodaniu alkoholu. Zwiększona prędkość obrotowa powinna byłaby skutkować zmniejszoną powierzchnią filmu paliwa, tym-

czasem obserwuje się sytuację odwrotną, co pozostawia swój ślad na zjawiskach dynamicznych podczas gwałtownych zmian warunków pracy silnika.

Rysunki 11 i 13 świadczą o tym, że próba analizy na podstawie wizualizacji dolnej obciążona jest dużym błędem metody badawczej. Zatem wniosek wynikający z przeprowadzonej analizy jest taki, że wizualizacja boczna jest lepszym narzędziem do obserwacji procesu tworzenia filmu paliwa dla wtrysku pośredniego. Zaburzenie relacji jakościowych obok zaburzeń relacji ilościowych może powodować zmiany błędu dynamicznego sterowania po dodaniu do paliwa części alkoholowej.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wizualizacyjne wtrysku benzyny oraz E85 do przewodu dolotowego silnika pozwalają na dokładniejsze poznanie zja-

wisk zachodzących podczas wtrysku takich jak: formowanie się strugi paliwa, udział odparowanej i nieodparowanej strugi paliwa czy efekt rozpadania kropel. Badania wykazały istnienie znacznych różnic w zachowaniu strugi oraz powstawaniu filmu paliwowego w zależności od wtryskiwanego paliwa. Zmiana charakterystyki formowania strugi oraz powstawania filmu paliwowego na ściankach przewodu dolotowego powoduje konieczność uwzględnienia tych zjawisk w algorytmie sterowania w przypadku konwersji systemu zasilania silnika benzyną na zasilanie mieszanką zawierającą dodatek biopaliwa (E85).

Niemniej jednak w celu dokładniejszego określenia wielkości filmu paliwowego należy przeprowadzić badania symulacyjne wyjaśniające w sposób dużo bardziej precyzyjny i w sposób dużo bardziej parametryczny uzyskane wyniki w badaniach wizualizacyjnych.

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

E85 Bioethanol E85/*bioetanol E85*

Bibliography/Literatura

- [1] Cheng Y., Deng K., Li T.: Measurement and simulation of wall-wetted fuel film thickness. *International Journal of Thermal Sciences* 49, 2010, str. 733-739
- [2] Idzior M., Lijewski P.: Zastosowanie metod wizualizacji do oceny jakości rozpylenia paliwa przez wtryskiwacze silników o zapłonie samoczynnym. *Journal of Kones. Combustion Engines*, Vol 8, Nr 3-4, 2001.
- [3] Lenz H.: *Mixture Formation in Spark Ignition Engines*. Springer Verlag, Wiedeń, 1992.
- [4] Milton B. E., Behnia M., Ellerman D. M.: Fuel deposition and re-atomisation from fuel/air flows through engine inlet valves. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22, 2001, str. 350-357.
- [5] Szlachetka M.: The comparative research on the occurrence of the fuel film phenomenon in petrol and ethanol fuelled engines. PTNSS-2013-SC-046.
- [6] Wendeker M.: *Sterowanie wtryskiem benzyny*. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1999.
- [7] Williams P., Beckwith P.: The Effect of Fuel Composition and Manifold Conditions Upon Spray Formation from an SI Engine Pintle Injector. SAE Technical Paper 941865 1994.
- [8] www.visionresearch.com

Mr Marcin Szlachetka, DEng – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering at the Lublin University of Technology.

Dr inż. Marcin Szlachetka – doktor na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

