

Dr hab. inż. Ireneusz Pielecha

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Ireneusz.Pielecha@put.poznan.pl

Mgr inż. Maciej Skowron

Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Politechnika Poznańska
Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska
E-mail: Maciej.Skowron@put.poznan.pl

Dr inż. Aleksander Mazanek

Zakład Oceny Właściwości Eksploatacyjnych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
Lubicz 25A, 31-503 Kraków, Polska
E-mail: MazanekA@inig.pl

Ocena eksploatacyjnego zużycia wtryskiwaczy na podstawie analizy optycznej rozpylenia paliwa**Streszczenie**

Diagnostyka elementów silnika spalinowego wymaga obecnie integracji wielu dziedzin techniki i nauki w celu szybkiej i trafnej lokalizacji uszkodzenia lub poszukiwania przyczyn niesprawności.

Artykuł dotyczy analizy zużycia wtryskiwaczy na podstawie wskaźników geometrycznych strugi rozpylanego paliwa. Na podstawie kilku dostępnych wielkości badawczych dokonano wyboru pozwalającego najlepiej ocenić zużycie wtryskiwaczy w warunkach ich eksploatacji. Do oceny diagnostycznej zużycia wtryskiwaczy wykorzystano badania optyczne rozpylenia paliwa. Przedstawiono różne wskaźniki geometryczne strugi paliwa, wskazując na ich użyteczność diagnostyczną oraz możliwość zastosowania. W podsumowaniu stwierdzono, że badania obecnych układów wtryskowych wymagają połączenia mechanicznych metod diagnostyki wtryskiwaczy oraz zaawansowanej diagnostyki optycznej rozpylenia paliwa.

Słowa kluczowe: wtrysk paliwa, rozpylenie paliwa, kąt stożka strugi, badania optyczne

1. Wprowadzenie

Diagnostyka elementów silnika spalinowego wymaga obecnie integracji wielu dziedzin techniki i nauki w celu szybkiej i trafnej lokalizacji uszkodzenia lub poszukiwania przyczyn niesprawności. Jednym z najbardziej newralgicznych systemów silnika jest układ wtryskowy, który w silnikach o zapłonie samoczynnym wymaga spełnienia znacznie bardziej rygorystycznych reżimów dokładności wykonania i pasowania niż w silnikach o zapłonie iskrowym. Ocenę elementów układu wtryskowego, a w szczególności wtryskiwaczy, w wyniku ich eksploatacji prowadzi się, analizując stopień ich zanieczyszczenia osadami zewnętrznymi lub wewnętrznymi powstałymi w wyniku spalania paliw i oleju smarującego [16]. Stosowanie dodatków do olejów napędowych powinno ograniczyć powstawanie takich osadów.

Badania nad zastosowaniem dodatków uszlachetniaczy detergentowo-dyspergujących prowadzili Beck i in. [1]. Wykazali oni, że dodatki te nadają się do zwiększenia odporności na utlenianie czystego oleju napędowego oraz mieszanin biodiesla z olejem napędowym. W odniesieniu do badanych próbek paliw – biodiesel, olej napędowy i ich mieszanek, zmniejszenie

stabilności utleniania na skutek długotrwałego okresu przechowywania może być częściowo skompensowane przez zastosowanie wybranych dodatków dyspergująco-detergentowych. Dodatki zapobiegają tworzeniu się rodników i neutralizują kwasy karboksylowe, a w związku z tym zwiększają stabilność utleniania próbek.

Żak i in. [19] analizując wpływ dodatków detergentowo-dyspergujących wykazali, że mają one znaczący wpływ zarówno na stan aparatury paliwowej silników o zapłonie samoczynnym oraz na zmniejszenie emisji spalin (głównie cząstek stałych).

Khalife i in. [5] analizując wpływ różnych dodatków na zużycie paliwa i emisję składników szkodliwych wykazali, że dodatki utleniające w największym stopniu wpływają na powyższe wielkości. Zwiększają one zużycie paliwa, ale jednocześnie redukują emisję CO i HC oraz PM, zwiększając nieco wartości NO_x. Wykazano również, że najmniejszy wpływ na powyższe wielkości mają dodatki bazujące na niemetalach (nanorurki węglowe).

Dużego znaczenia nabierają obecnie nanododatki do paliw. Pełną ich charakterystykę przedstawił Shaafi i in. w pracy [15]. Przedstawili oni wpływ zastosowania nanododatków metali, tlenków metali, cieczy magnetycznych, nanorurek węglowych oraz mieszanin na warunki pracy silnika oraz jego emisję. Stwierdzono, że zastosowanie nanododatków w postaci mieszanin do czystego oleju napędowego zwiększa emisję tlenków azotu, ze względu na zwiększenie maksymalnej temperatury w komorze spalania. Wykazano, że emulsyfikacja (zastosowanie wody) jest najlepszą metodą ograniczenia emisji NO_x, jednak ograniczeniu ulegają także osiągi silnika.

Ograniczenie osadów może prowadzić do zmian rozpylenia paliwa i jego spalania w komorze silnika. Z tego względu niezbędne są badania pozwalające na określeniu wskaźników geometrycznych strugi paliwa, nie tylko w wyniku eksploatacji elementów, ale również w wyniku zastosowania dodatków uszlachetniających.

Badania strugi paliwa prowadzi się głównie w celu określenia głównych wskaźników rozpylenia jakimi są: zasięg strugi, pole powierzchni strugi (określone jako płaska ekspozycja obrazu) oraz kąt stożka strugi. W wielu badaniach wykorzystuje się komory stałej objętości do badania tych wielkości przy wykorzystaniu oświetlenia lampami halogenowymi [13], LED [7] lub światłem laserowym [18].

Badania wskaźników geometrycznych strugi paliwa prowadzone są przeważnie z użyciem metod optycznych. Pozwalają one na precyzyjne wyznaczenie zasięgu strugi w zróżnicowanych warunkach temperatury ośrodka. Często uwzględniają one również zmianę kąta obserwacji w celu uwzględniania poprawek przy określaniu zasięgu strugi. Płaską ekspozycję obrazu wykorzystuje się do określenia pola powierzchni strugi. Znane są metody maskowania każdej ze strug w celu indywidualnego określania parametrów. Kąt stożka strugi określany jest kilkoma metodami. Podstawowe pozwalają na jego wyznaczenie w dowolnej odległości od rozpylacza, analizując szerokość strugi w danym przekroju [8]. Inne bazują na uśrednianiu takich wielkości po uwzględnieniu kilku wartości szerokości strugi. Najnowsza metoda, pozwalająca na pewną automatyzację obróbki, została określona przez Nabera i Siebersa [8]. Uwzględnia ona wyznaczenie kąta na podstawie znajomości pola powierzchni strugi oraz jej zasięgu [10]. Tak więc do wyznaczenia kąta stożka strugi niezbędna jest znajomość poprzednio wskazanych wielkości.

Ghahremani i in. [2] na podstawie badań eksperymentalnych określili wskaźniki geometryczne strugi paliwa. Wykorzystując właściwości fizyko-chemiczne paliwa (bio-diesel) wyznaczono równania określające zasięg i pole powierzchni strugi (uwzględniono gęstość paliwa i ośrodka, lepkość kinematyczną oraz napięcie powierzchniowe paliwa). Maksymalny błąd wyznaczenia zasięgu strugi nie przekraczał 9%, a pola powierzchni – 12%.

2. Motywacja podjęcia tematu

Badania wskaźników rozpylenia paliwa prowadzone w odniesieniu do wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym, dotyczą przede wszystkim oceny zmian wskaźników geometrycznych strugi w wyniku eksploatacji takich konstrukcji. W niniejszej pracy celem Autorów było oprócz uzyskania powyższych informacji, także określenie wpływu różnych paliw na powyższe wskaźniki. Kolejnym zagadnieniem poznawczym było oszacowanie czasu rozpylenia paliwa, po którym możliwe jest określenie dających się opisać zmian wskaźników geometrycznych.

3. Metodyka badań

3.1. Obiekty badań

Badania wskaźników geometrycznych strug paliwa w odniesieniu do różnych paliw prowadzono na trzech grupach wtryskiwaczy i dwóch rodzajach paliwa. Wykorzystano wtryskiwacze nowe (oznaczone jako n1) oraz wtryskiwacze eksploatowane w pojazdach (oznaczone jako u1 oraz u2). Ich charakterystykę przedstawiono w tabelicy 1. Badany wtryskiwacz charakteryzował się 8-otworkowym rozpylaczem o kącie między strugami wynoszącym 162°.

W badaniach wykorzystano bazowy olej napędowy (paliwo B7 oznaczone jako #1) oraz olej napędowy uszlachetniony pakietem dodatków (oznaczony jako #2).

Tablica 1. Charakterystyka wtryskiwaczy wykorzystanych w badaniach

Wtryskiwacz	Paliwo	Uwagi	Okres eksploatacji wtryskiwacza [km]
n1	#1	Wtryskiwacz nowy	0
n1	#2	Wtryskiwacz nowy	0
u1	#1	Wtryskiwacz używany/pojazd 1	80 000
u2	#2	Wtryskiwacz używany/pojazd 2	80 000

Paliwo uszlachetnione (dodatki, których poziom dozowania wynosił 300 mg na 1 kg paliwa), zawierało dodatek detergentowo-dyspergujący o strukturze alkenyloburszty-noimidoamidu zsyntezowany w INiG-PIB oraz następujące dodatki handlowe: dodatki demulgujące, dodatek przeciwienny, dodatek przeciwkorozyjny, dodatek biobójczy i rozpuszczalnik (skład pakietu zastrzeżono w UPRP nr zgłoszenia P.413866). Właściwości obu typów oleju napędowego przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2. Wybrane właściwości bazowego i modyfikowanego oleju napędowego

Rodzaj badania	Jednostka	Wynik badania	
		ON B7	ON uszlachetniony INIG
Indeks cetanowy	–	57,6	57,8
Liczba cetanowa	–	53,3	54,7
Gęstość w temperaturze 15 °C	kg/m ³	828,7	828,6
Zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych	% (m/m)	1,1	
Zawartość siarki	mg/kg	poniżej 5	poniżej 3,0
Temperatura zapłonu	°C	88	87,5
Pozostałość po koksowaniu (z 10% pozostałości destylacyjnej)	% (m/m)	0,062	0,074
Pozostałość po spopieleniu	% (m/m)	0,001	0,004
Zawartość wody	% (m/m)	0,005	0,0005
Zawartość zanieczyszczeń	mg/kg	2,1	6,7

Tablica 2cd. Wybrane właściwości bazowego i modyfikowanego oleju napędowego

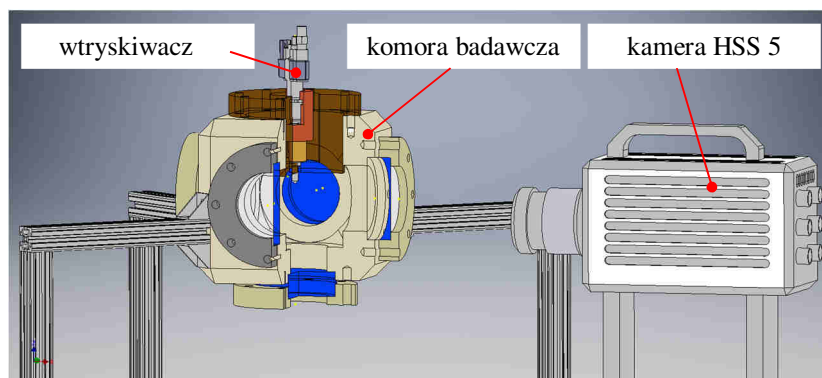
Rodzaj badania	Jednostka	Wynik badania	
		ON B7	ON uszlachetniony INIG
Badanie działania korodującego na stali (3 h, w temperaturze 38°C)	stopień korozji	śląd B ⁺⁺	śląd korozji
Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME)	% (V/V)	5,6	–
Odporność na utlenianie	h g/m ³	35,9 7	2,0
Smarność, skorygowana średnica śladu zużycia (WS 1,4) w temperaturze 60°C	µm	180	337
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40°C	mm ² /s	2,7175	2,711
Skład frakcyjny	% (V/V)	27,3	26,3
do temperatury 250 °C destyluje	% (V/V)	97,7	97,2
do temperatury 350 °C destyluje	°C	333,0	328,0
95% (V/V) destyluje do temperatury			

3.2. Aparatura badawcza

Do wyznaczenia wskaźników geometrycznych strugi paliwa wykorzystano komorę stałej objętości o zadanej wartości przeciwności osrodka, do którego następował wtrysk oleju napędowego (dokładny opis komory znajduje się w [14]). W badaniach zastosowano wtrysk paliwa o wartości 35 MPa (co odpowiada warunkom biegu jałowego oraz małego obciążenia) i czasie otwarcia wtryskiwaczy o wartości 0,3 ms. Są to warunki, przy których istnieje możliwość dokładnego określenia wskaźników geometrycznych strugi. Jednocześnie możliwe jest określenie wpływu eksploatacji wtryskiwaczy na przebieg wskaźników rozpylenia. Duże wartości ciśnienia wypływającego paliwa skutkują dużą prędkością wypływu, co powoduje, że w danym zakresie pomiarowym możliwy jest zapis mniejszej liczby danych. Zakres pomiarowy wynika z wielkości okien wizyjnych komory stałej objętości [13]. W analizowanych badaniach wielkość okna kwarcowego wynosiła 90 mm – rys. 1.

Wtrysk paliwa do komory o stałej objętości zapewniono przy użyciu systemu wtrysku oleju z jego kondycjonowaniem – STPiW3 firmy Mechatronika. System wykorzystuje pompę CP4.1 o maksymalnym ciśnieniu paliwa 200 MPa. W celu zapewnienia porównywalnych warunków badań, utrzymywano temperaturę paliw o wartości 42°C.

Analizę optyczną procesu wtrysku i rozpylenia paliwa prowadzono z użyciem szybkiej, monochromatycznej kamery HSS5 firmy LaVision, pozwalającej na filmowanie sekwencji obrazów z szybkością 10 kHz ($\Delta t = 100 \mu s$) przy zachowaniu rozdzielczości 512×512 pikseli (przykłady badań przedstawiono w [12]). Obszar roboczy wynosił 410 pikseli, co przy wielkości okna pomiarowego (90 mm) pozwala na odwzorowanie 1 pix = 220 µm (lub 1 mm = 4,55 piksela). Wartość taka jest wystarczająca do prowadzenia dokładnych analiz wskaźników geometrycznych strugi paliwa.



Rys. 1. Stanowisko badawcze

3.3. Metodyka analizy wyników

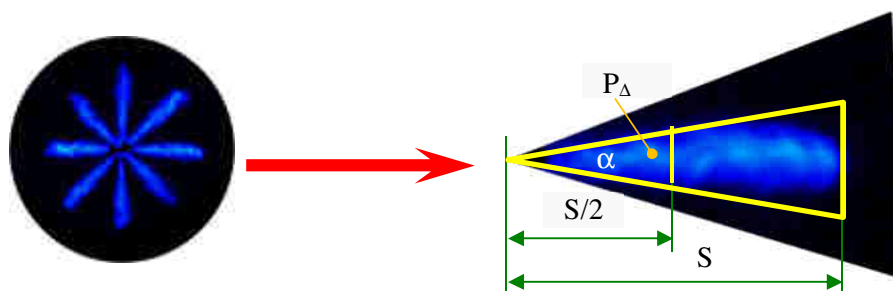
Rejestrowane obrazy poddano dalszej obróbce w celu uzyskania wskaźników rozpylenia paliw z wtryskiwaczy o różnym czasie ich eksploatacji (nowe i używane).

Badania wskaźników rozpylenia prowadzono niezależnie dla każdej z ośmiu strug paliwa i wyznaczano:

- zasięg strugi; określono jako maksymalną odległość od rozpylacza do przyjętej umownie granicy luminancji obrazu strugi. Przygotowanie obrazów do oceny zasięgu strugi polegało na wyselekcjonowaniu obszaru badawczego (zastosowanie maskowania obrazu) oraz odjęcia tła pomiarowego (szumu pomiarowego). Wyznaczenie zasięgu strugi prowadzono dla każdej strugi indywidualnie.
- obszar strugi paliwa; określono jako liczbę pikseli o zadanym przedziale intensywności luminancji obrazu. Badania takie prowadzono na podstawie wyznaczenia współrzędnych trójkątów opisanych na każdej ze strug paliwa.
- kąta stożka strugi paliwa; wartość tę wyznaczono wykorzystując rozwiązanie podane przez Nabera i Siebersa [8]. Możliwe jest wykorzystanie typowych algorytmów poszukujących stożka strugi na podstawie krawędzi obszarów strugi, jednak metoda ta jest ze względu na małą dokładność i brak precyzyjnych wytycznych co do określania zasad takich badań, obecnie jest coraz rzadziej stosowana. Metodę Nabera i Siebersa można stosować do dowolnych wtryskiwaczy z silników o zapłonie samoczynnym o zróżnicowanych kątach wypływu paliwa [9]. Algorytm ten wymaga określenia zasięgu strugi paliwa, a następnie przyjęciu połowy tej wartości i określenia dla takiego zasięgu pola powierzchni strugi. Na tej podstawie możliwe jest wyznaczenie połowy kąta stożka strugi:

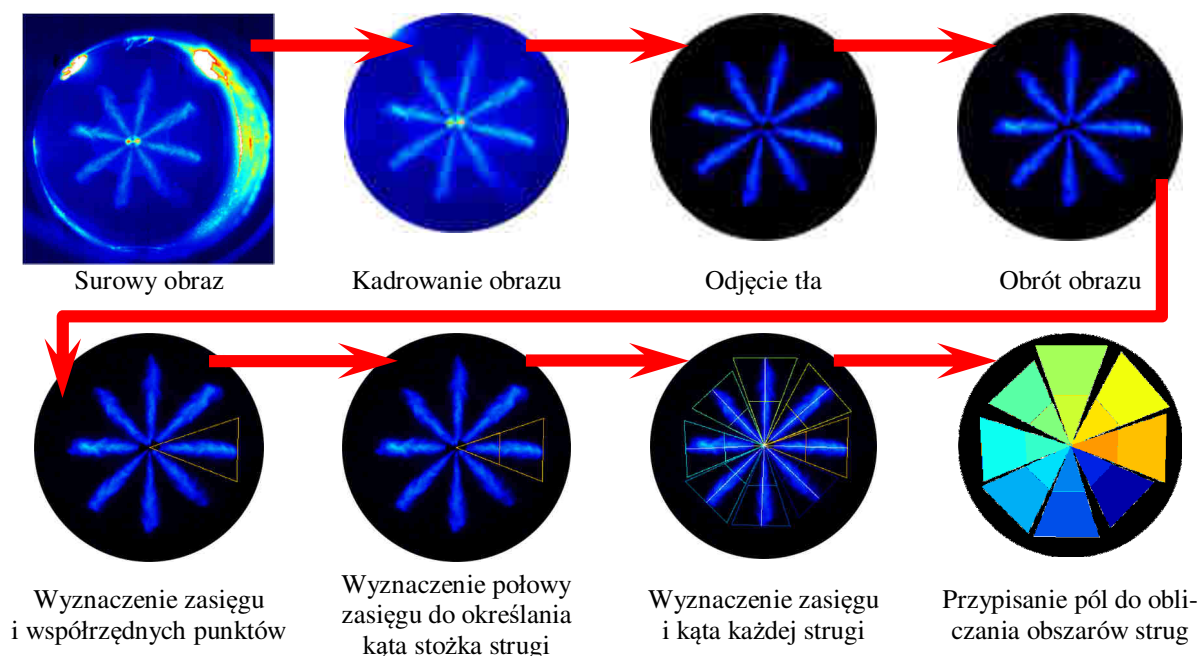
$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{P_{\Delta}}{(S/2)^2}$$

gdzie: α – kąt stożka strugi, P_{Δ} – pole trójkąta, S – maksymalny zasięg strugi (rys. 2).



Rys. 2. Sposób określania kąta stożka strugi

Sposób obróbki zdjęć oraz wyznaczenia poszczególnych wskaźników rozpylenia przedstawiono na rys. 3. Wyniki uzyskane na tej podstawie (dla każdej strugi oraz dla pełnego czasu rozpylenia) powodują, że wyniki uzyskane dla początkowych wartości rozwoju strugi będą obarczone dużym błędem wynikającym z małego pola powierzchni rozwoju strugi. Wraz z rozwojem strugi, wartości uzyskanego kąta stożka strugi powinny kształtować się na stałym poziomie.



Rys. 3. Obróbka obrazów i określenie wskaźników geometrycznych strugi paliwa

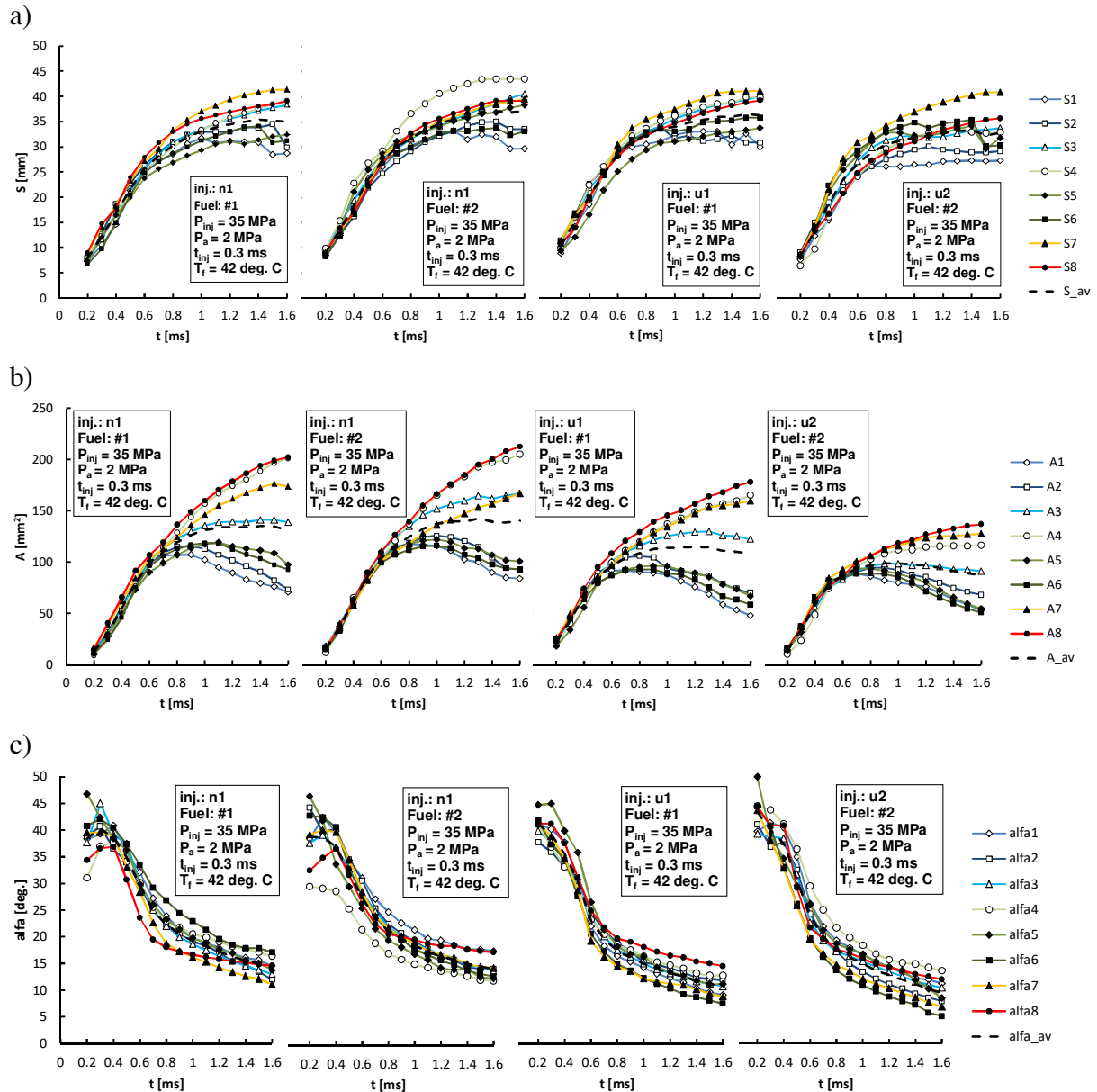
4. Analiza wielkości geometrycznych rozpylenia paliwa i wybór wskaźnika porównawczego

4.1. Ocena indywidualnych wartości wskaźników rozpylenia paliwa

Przedstawioną powyżej metodykę prac badawczych wykorzystano do określenia zasięgu poszczególnych strug paliwa. Na ich podstawie wyznaczono wartość średnią, którą przedstawiono w postaci linii bez naniesionych punktów pomiarowych (rys. 4a). Prowadzone badania wskazują na występowanie podobieństwa zasięgu poszczególnych strug wtryskiwanego paliwa. Jednocześnie pozwalają na stwierdzenie, że konieczna jest analiza każdej ze strug, gdyż arbitralny wybór jednej strugi nie pozwala na pełną analizę takiego rozpylenia. W analizowanych badaniach można wskazać strugi reprezentatywne – zbliżone przebiegiem do średniej. Jednak ich wybór jest możliwy po indywidualnej analizie rozpylenia. Podczas badań stwierdzono brak znaczących różnic w zasięgu poszczególnych strug paliwa przy wykorzystaniu paliwa standardowego (olej napędowy). Podczas analizy zasięgu paliwa modyfikowanego stwierdzono, że istnieją dwie strugi znacząco różniące się od pozostałych. Przypadki takie wystąpiły zarówno podczas analizy zasięgu nowych oraz eksploatowanych wtryskiwaczy. Na podstawie oceny zasięgu pojedynczych strug paliwa nie można wnioskować o zróżnicowaniu zużycia wtryskiwaczy, ani o zmianie tego wskaźnika przez zastosowanie różnych paliw.

Analiza pola powierzchni strug wtryskiwanego paliwa wskazuje na istnienie znaczących różnic w określaniu tej wielkości. Na podstawie oceny tego wskaźnika możliwa jest ocena zużycia eksploatacyjnego wtryskiwacza, gdyż pole powierzchni strug jest znacząco mniejsze (rys. 4b). Na tej podstawie stwierdzono, że analiza tylko jednej strugi paliwa również nie może być reprezentatywna do określania zmian eksploatacyjnych wtryskiwaczy.

Ocena kąta stożka strugi paliwa (rys. 4c) wskazuje na istnienie najmniejszych wartości rozrzutów wskaźnika (rozrzuty podczas $t = 1,6$ ms między nowymi wtryskiwaczami wynoszą 4 punkty procentowe). Analiza zmian tego kąta wskazuje na dużą powtarzalność określania wskaźnika dla każdej ze strug paliwa. Jednocześnie możliwe jest określenie zużycia eksploatacyjnego wtryskiwaczy, gdyż wraz ze zwiększaniem czasu eksploatacji zmniejszeniu ulega kąt stożka strugi.



Rys. 4. Wyniki badań wskaźników rozpylenia paliw: a) zasięgu strug – S, b) pola powierzchni strug – A, c) kąta stożka strug – alfa

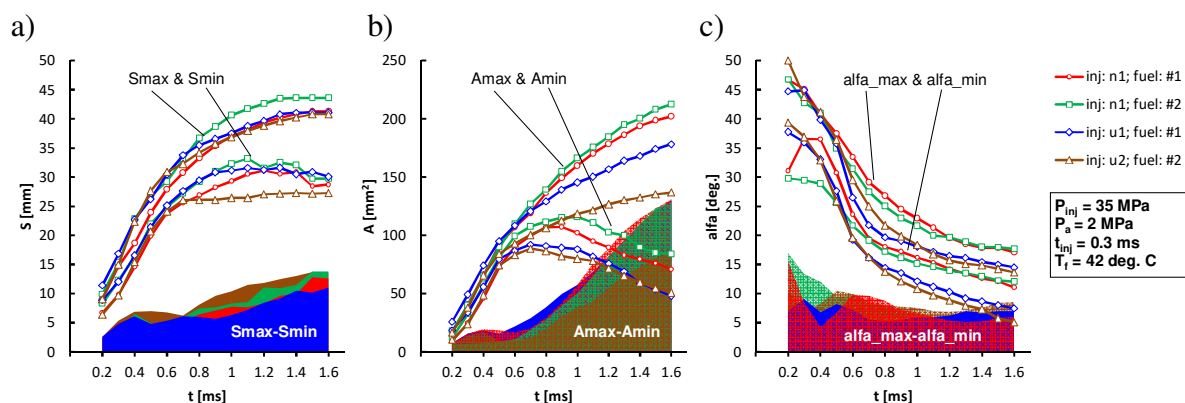
4.2. Ocena granicznych wskaźników rozpylenia paliwa

Ze względu na przedstawione powyżej rozbieżności we wskaźnikach poszczególnych strug rozpylonego paliwa określono ich wartości graniczne. Analiza zasięgu strug wskazuje na zwiększenie różnic wraz z rozwojem strug paliwa. Wartości graniczne rozrzutów są do siebie zbliżone (rys. 5a). Do czasu 0,6 ms różnice w zasięgu strug są niewielkie i wynoszą około 14,9% dla nowych wtryskiwaczy niezależnie od typu paliwa. Po tym czasie wartości te zwiększają się do 30,5% podczas wtrysku obu paliw (przy czasie rozpylenia $t = 1,6$ ms od

czasu rozpoczęcia wtrysku). Dla używanych wtryskiwaczy rozrzuty wynoszą odpowiednio dla paliw #1 oraz #2: 17,5% oraz 22% (0,6 ms po rozpoczęciu wtrysku) oraz 26,9% i 33% (przy czasie 1,6 ms).

Wartości graniczne pól powierzchni są dość zróżnicowane. (rys. 5b) Badania wtryskiwaczy nowych wskazują na znacznie mniejsze rozrzuty między nimi niż wtryskiwaczy eksploatowanych. Jednak analiza wartości bezwzględnych pozwala na stwierdzenie, że rozrzuty w takim przypadku są mniejsze (między eksploatowanymi wtryskiwaczami zasilanymi różnymi paliwami). Mniejsze pole powierzchni to spowodowane zużyciem eksploatacyjnym (zapiekanie otworków rozpylaczy), mniejsze różnice wynikają z jednakowego zużycia. Wtryskiwacze nowe charakteryzowały się zwiększonymi różnicami wykonania lub obróbki końcowej i jednoczesnym brakiem kilkunastogodzinnej pracy eksploatacyjnej. Do czasu 0,6 ms różnice pól powierzchni strug są niewielkie i wynoszą 15-19%. W obu przypadkach badań stwierdzono rozrzuty końcowych wartości pola powierzchni (przy czasie $t = 1,6$ ms po rozpoczęciu wtrysku) o wartości 60-75%. Wynik taki może być spowodowany zróżnicowaną dokładnością wykonania otworków wtryskiwacza. Zmiana rozrzutów między analizą pól różnych paliw ($t = 1,6$ ms) nie przekracza 5 punktów procentowych (wtryskiwacze nowe) oraz 11 punktów procentowych podczas analiz wtryskiwaczy eksploatowanych w silniku.

Zmiany kąta stożka strugi paliwa są dość jednakowe w całym czasie rozpylenia. Początkowe duże wartości kąta wynikają z małego zasięgu strugi paliwa. W dalszym czasie wtrysku paliwa obserwuje się jednakowe zmiany dla każdej z badanych prób. Do czasu 0,68 ms różnice w zasięgu strug wynoszą około 30%. Po tym czasie wartości te wynoszą nadal około 30% (przy czasie rozpylenia $t = 1,6$ ms). Na tej podstawie można stwierdzić, że jest to wskaźnik który charakteryzuje się małą wielkością zmian wraz z czasem rozpylenia paliwa. Jednocześnie dla wszystkich przeprowadzonych prób wartości rozrzutów kąta strugi paliwa zmniejszają się, uzyskując po czasie około 1 ms stałe wartości (rozrzuty poniżej 10 deg między strugami).



Rys. 5. Ocena wartości granicznych i różnic tych wielkości podczas rozpylenia paliw: a) zasięg strug – S, b) pole powierzchni strug – A, c) kąt stożka strug – alfa

4.3. Ocena średnich wskaźników rozpylenia paliwa

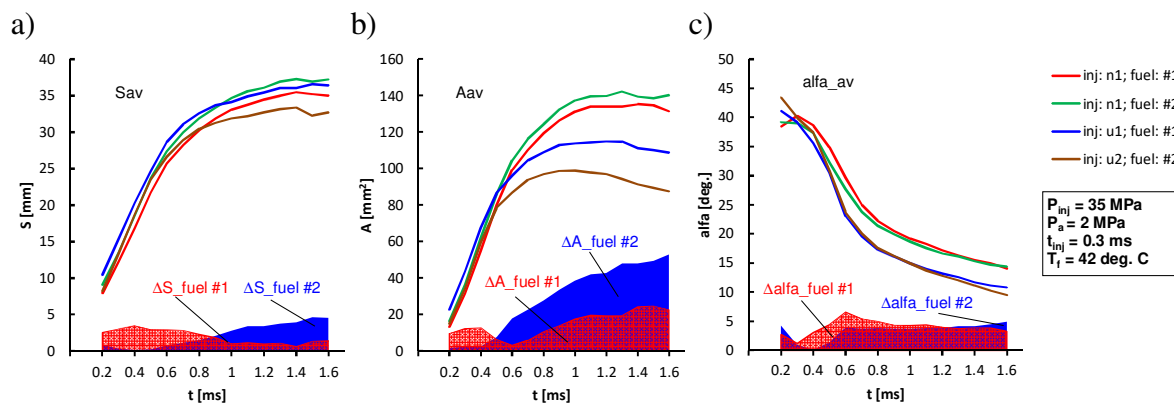
Ze względu na przedstawione powyżej rozbieżności we wskaźnikach poszczególnych strug rozpylonego paliwa określono ich uśrednione wartości (rys. 6).

Rozpylenie paliwa z wtryskiwaczy nowych wskazuje na większy zasięg paliwa uszlachetnionego (wzrost o 5%). Warunki eksploatacji powodują powstanie niejednoznacznych wyników (rys. 6a). Zasięg paliwa z wtryskiwaczy zasilanych olejem napędowym zwiększył się o 6%, natomiast zasilanych paliwem z dodatkiem uszlachetniacza – zmniejszył się o 11%. Jak wynika z powyższej analizy brak jest jednoznacznych wyników, co wskazuje na konieczność

dokonania dodatkowych analiz geometrii strugi paliwa w celu określenia różnic w rozpyleniu paliwa między różnymi wtryskiwaczami oraz przy wykorzystaniu różnych paliw.

Analiza średnich wartości pola strugi paliwa wskazuje na możliwość oceny zarówno zużycia wtryskiwaczy, jak również zastosowanych paliw (rys. 6b). Wynika to ze znacznych zmian analizowanych wielkości. Większym obszarem rozpylenia paliwa charakteryzują się wtryskiwacze nowe (niezależnie od typu paliwa). Wartości te są większe odpowiednio o 20% (paliwo #1) oraz o 60% (paliwo #2). Większe wartości rozpylenia (o 6%) uzyskano przy zasilaniu paliwem #2 dla nowych rozpylaczy. W przypadku eksploatowanych układów większe pole wykazano podczas zasilania wtryskiwaczy paliwem #1 – o 24%. Uwzględnienie pola powierzchni w analizie wskaźników geometrycznych strug paliwa jest wielkością, która pozwala na identyfikację zużycia wtryskiwaczy oraz pozwala na określenie różnic podczas rozpylenia różnych paliw.

Analiza średnich wartości kąta stożka strugi wskazuje na dużą przydatność tego wskaźnika do oceny rozpylenia paliw podczas eksploatacji wtryskiwaczy (rys. 6c). Przedstawiona analiza średniego kąta stożka strugi pozwala na wykazanie istotnych różnic w ocenie nowych i eksploatowanych wtryskiwaczy. Warunki eksploatacji pogarszają wskaźniki pracy wtryskiwaczy (zapiekanie i koksowanie rozpylaczy), co powoduje, że kąt stożka strugi ulega zmniejszeniu. Różnice między nowymi i eksploatowanymi wtryskiwaczami wynoszą około 30%. Można zauważyć, że po pewnym czasie (około 0,8 ms od rozpoczęcia wtrysku) wartości tych różnic są stałe. W przypadku testowanych paliw nie jest możliwe określenie różnic w rozpyleniu paliwa z nowych lub eksploatowanych wtryskiwaczy (różnice w kącie rozpylenia dla używanych wtryskiwaczy zawierają się w granicach do 5%). Wyniki analizy kąta stożka strugi tą metodą są zbieżne (w zakresie tendencji zmian podczas rozpylenia) z wynikami uzyskanymi w badaniach mieszaniny n-pentanolu i oleju napędowego przez Ma i in. [7].

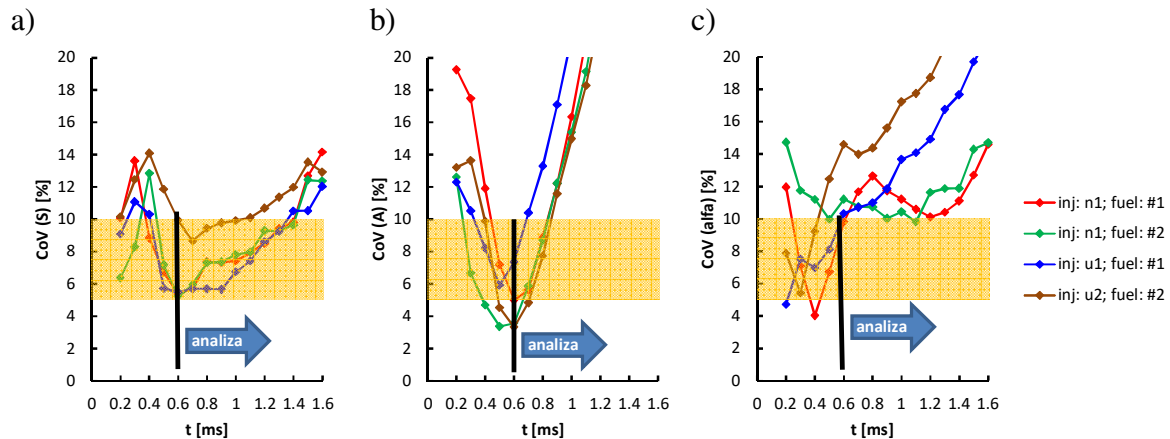


Rys. 6. Ocena średnich wskaźników rozpylenia paliwa wraz z wartościami granicznymi i różnicami tych wielkości: a) zasięg strug – S, b) pole powierzchni strug – A, c) kąt stożka strug – alfa

5. Wybór warunków badawczych do oceny wskaźników rozpylenia paliwa

Na podstawie uzyskanych wartości średnich wskaźników rozpylenia paliw określono współczynnik zmienności (jako wartość odchylenia standardowego odniesionego do wartości średniej) dla każdego czasu wtrysku paliwa. Ze względu na to, że wartość samego odchylenia standardowego zależy od wartości średniej, co powoduje że wraz ze zwiększaniem zasięgu wartość ta będzie również zwiększać się, wybrano wskaźnik, który jest niezależny od wartości średniej. W ten sposób możliwe jest określenie czasu, po którym można wykazać jedynie zwiększanie wartości wskaźnika. W badaniach silników spalinowych przyjmuje się, że wartość wskaźnika zmienności odniesionego do średniego ciśnienia indykowanego nie powinien przekraczać 3,5%-5% [6, 17] lub wartości 10% [4]. Ze względu na dużo większą niepowtarzalność kąta stożka wtryskiwanego paliwa przyjmuje się, że w takich badaniach może uży-

skiwać wartość do 40% [3]. Uwzględniając powyższe założenia, przedstawiono analizę, obejmującą określenie minimum współczynnika zmienności. Wykazano, że istnieje czas, po którym wartość danego wskaźnika geometrii strugi paliwa ulega jedynie zwiększeniu (rys. 7). Przyjmując powyższe założenia przyjęto, że minimalny czas analizy rozpylenia paliwa po którym możliwe jest określenie różnic w sposobie rozpylenia paliwa wynosi 0,6 ms od rozpoczęcia wtrysku. Dopiero po takim czasie uwidaczniają się zmiany w zasięgu strugi, polu powierzchni oraz kąta stożka rozpylanego paliwa. Przyjęcie do analizy większej wartości czasu powoduje że jest ona prawidłowa, jednakże najlepszą oceną jest znajomość całego przebiegu rozpylenia paliwa.



Rys. 7. Wybór czasu analizy wskaźników rozpylenia na podstawie współczynnika zmienności: a) zasięgu strug – CoV(S), b) pola powierzchni strug – CoV(A), c) kąta stożka strug – CoV(alfa)

6. Wnioski

Prowadzenie badań dotyczących określania wskaźników geometrycznych strugi paliwa wymagają prowadzenia badań optycznych, w których uwzględnienie różnych wielkości ma duże znaczenie. Określenie wskaźników geometrycznych strugi paliwa wymaga zastosowania procedur określających wskaźniki każdej strugi osobno oraz jej dalsze uśrednianie. Konieczna jest analiza każdej ze strug, gdyż arbitralny wybór jednej strugi nie pozwala na pełną analizę takiego rozpylenia. Ze względu na duże rozrzuty między poszczególnymi otworkami rozpylacza, rozpylane paliwo uzyskuje duże rozrzuty wartości wskaźników dla każdej strugi.

W celu określenia wpływu typu paliwa przy uwzględnieniu tych samych wtryskiwaczy niezbędne jest wykonanie badań obszaru zajmowanego przez strugi paliwa oraz kąta stożka strugi. Przy dużym podobieństwie właściwości fizycznych badanych paliw, zasięg strugi paliwa nie wykazuje takich zmian, które pozwolą na wskazanie różnic w ich rozpyleniu.

Ocena wielkości eksploatacyjnego zużycia wtryskiwaczy wymaga znajomości obszaru strugi paliwa oraz kąta stożka strugi. W tym przypadku kąt stożka strugi wtryskiwanego paliwa jest znaczącym wskaźnikiem geometrii strugi wskazującym na jego zmiany w wyniku eksploatacji wtryskiwacza.

Wnioski szczegółowe dotyczące wskaźników geometrycznych strugi sformułowano w odniesieniu do wartości średnich uzyskanych na podstawie analizy każdej ze strug paliwa:

- 1) w zakresie zasięgu:
 - a) podobieństwo cech fizycznych analizowanych paliw powoduje, że różnice zasięgu z nowych wtryskiwaczy są niewielkie i wynoszą około 5% na korzyść paliwa uszlachetnionego,
 - b) podczas analizy eksploatowanych wtryskiwaczy uzyskano odmienne wyniki: zasięg paliwa z wtryskiwaczy zasilanych olejem napędowym zwiększył się o 6%, natomiast zasilanych paliwem z dodatkiem uszlachetniaczy – zmniejszył się o 11%,

- c) na podstawie zasięgu strugi nie można dokonać oceny charakterystyki wtrysku paliwa oraz zweryfikować zmian eksploatacyjnych,
- 2) w zakresie obszaru zajmowanego przez strugę paliwa:
 - a) wtryskiwacze nowe (niezależnie od zastosowanego paliwa) cechują się znacznie większym obszarem strugi niż wtryskiwacze eksploatowane; po czasie eksploatacji równym 80 000 km obszar ten uległ zmniejszeniu zarówno podczas wtrysku paliwa bazowego (20%) oraz podczas wtrysku paliwa uszlachetnionego (60%),
 - b) podczas rozpylenia paliwa przy użyciu nowych wtryskiwaczy, obszar strugi jest nieznacznie większy przy wtrysku paliwa z dodatkami uszlachetniającymi (o 6%); jest on znacząco mniejszy przy zasilaniu tym paliwem (o 24%) podczas badań wtryskiwaczy poddanych eksploatacji,
 - c) analiza średnich wartości pola strugi paliwa wskazuje na możliwość zastosowania tego wskaźnika zarówno do oceny zużycia wtryskiwaczy oraz sposobu rozpylenia różnych paliw (nawet o podobnych właściwościach); wynika to ze znacznych zmian analizowanych wielkości,
- 3) w zakresie kąta stożka strugi:
 - a) różnice między nowymi i eksploatowanymi wtryskiwaczami wynoszą około 30%,
 - b) w przypadku testowanych paliw nie jest możliwe określenie różnic w rozpyleniu paliwa z nowych lub eksploatowanych wtryskiwaczy (różnice w kącie rozpylenia dla używanych wtryskiwaczy zawierają się w granicach do 5%),
 - c) analiza wyników wskazuje na dużą przydatność tego wskaźnika do oceny rozpylenia paliw podczas analiz nowych i eksploatowanych wtryskiwaczy.

Przedstawione wyniki badań wskazują na bardzo duże możliwości oceny zużycia wtryskiwaczy. Jednakże pełna analiza dotycząca wpływu różnych paliw na ich wskaźniki geometryczne powinna być uzupełniona badaniami procesu spalania. Badania takie, stanowiące kolejny etap prac naukowych autorów, nad rozpoznaniem skutków wtrysku różnych paliw, powinny stanowić uzupełnienie wiedzy dotyczącej możliwości oceny różnych typów paliw w aspekcie eksploatacji wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym.

Literatura

1. Beck Á, Pölcsmann G, Eller Z. et al. Investigation of the effect of detergent–dispersant additives on the oxidation stability of biodiesel, diesel fuel and their blends. *Biomass and Bioenergy* 2014; 66: 328–336, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.050>.
2. Ghahremani A R, Saidi M H, Hajinezhad A, Mozafari A A. Experimental investigation of spray characteristics of a modified bio-diesel in a direct injection combustion chamber. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2017; 81: 445–453, <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.09.010>.
3. Hassen N S, Sidik N A C, Sheriff J M. Effect of nozzle type, angle and pressure on spray volumetric distribution of broadcasting and banding application. *Journal of Mechanical Engineering Research* 2013; 5(4): 76–81, <https://doi.org/10.5897/JMER2013.0272>.
4. Heywood J B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York, McGraw-Hill 1988.
5. Khalife E, Tabatabaei M, Demirbas A, Aghbashlo M. Impacts of additives on performance and emission characteristics of diesel engines during steady state operation. *Progress in Energy and Combustion Science* 2017; 59: 32–78, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2016.10.001>.
6. King J, Böcker O. Multiple injection and boosting benefits for improved fuel consumption on a spray guided direct injection gasoline engine. *Proceedings of the FIS-*

- TA 2012 World Automotive Congress. Lecture Notes in Electrical Engineering 2013; 189, Springer, Berlin, Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-33841-0_18.
7. Ma Y, Huang S, Huang R, Zhang Y, Xu S. Spray and evaporation characteristics of pentanol–diesel blends in a constant volume chamber. *Energy Conversion and Management* 2016; 130: 240–251, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.063>.
 8. Naber J, Siebers D. Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays. SAE Technical Paper 1996, 960034, <http://dx.doi.org/10.4271/960034>.
 9. Payri R, Gimeno J, Bardi M, Plazas A. Effect of injection rate shaping over diesel spray development in non reacting evaporative conditions. ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference 2012; 347–356, <http://dx.doi.org/10.1115/ICES2012-81206>.
 10. Payri F, Payri R, Salvador F J, Bardi M. Effect of gas properties on Diesel spray penetration and spreading angle for the ECN injectors. ICLASS 2012, 12th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany, September 2-6, 2012.
 11. Payri R, Viera J P, Gopalakrishnan V, Szymkowicz P G. The effect of nozzle geometry over the evaporative spray formation for three different fuels. *Fuel* 2017; 188: 645–660, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.064>.
 12. Pielecha I. Analysis of the repeatability of fuel spray indexes in a spray-guided spark-ignited direct-injection engine. *Combustion Engines* 2016; 164(1): 49–55.
 13. Pielecha I. Modeling of gasoline fuel spray penetration in SIDI engines. *International Journal of Automotive Technology* 2014; 15(1): 47–55, <http://dx.doi.org/10.1007/s12239-014-0005-y>.
 14. Pielecha I, Wisłocki K, Borowski P, Cieřlik W. Thermodynamical evaluation of usefulness of future hydrocarbon fuels for use in compression ignition engines. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2015; 122(1): 473–485, <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-015-4735-5>.
 15. Shaafi T, Sairam K, Gopinath A, Kumaresan G, Velraj R. Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel, biodiesel and blends—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 49: 563–573, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.086>.
 16. Stępień Z. A study of factors influencing the formation of harmful deposits in the diesel engine injectors. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2017; 19(3): 331–337, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2017.3.3>.
 17. Subic A, Wellnitz J, Leary M, Koopmans L. Sustainable automotive technologies 2012: Proceedings of the 4th International Conference, Springer Science & Business Media 2012; 404.
 18. Wei M, Gao Y, Yan F, Chen L, Feng L, Li G, Zhang C. Experimental study of cavitation formation and primary breakup for a biodiesel surrogate fuel (methyl butanoate) using transparent nozzle. *Fuel* 2017; 203: 690–699, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.05.022>.
 19. Źak G, Ziemiański L, Stępień Z, Wojtasik M. Engine testing of novel diesel fuel detergent–dispersant additives. *Fuel* 2014; 122: 12–20, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.055>.