MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
3-M/2012
ZESZYT 8
ROK 109
ISSUE 8
YEAR 109

MAREK IDZIOR, WOJCIECH KARPIUK, MACIEJ BIELIŃSKI,
TOMASZ BOROWCZYK, PAWEŁ STOBNICKI*

BADANIE WPŁYWU LICZBY I ŚREDNICY OTWORKÓW ROZPYLACZA NA PARAMETRY WTRYSKU BIOPALIW RZEPAKOWYCH

INFLUENCE OF NUMBER AND DIAMETERS OF NOZZLE SPRAYING HOLES ON RAPE BIOFUELS INJECTION PARAMETERS

Streszczenie

W artykule dokonano analizy możliwości poprawy rozpylenia biopaliw rzepakowych – brano pod uwagę nieprzetworzony olej rzepakowy oraz estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, a rezultaty odniesiono do paliwa konwencjonalnego. W badaniach wykorzystano dwa rozpylacze różniące się liczbą otworków rozpylających i ich średnicą. Wtrysk paliwa był rejestrowany za pomocą systemu EVS 513D (Engine Video System) produkcji AVL, co pozwoliło na szczegółową analizę procesu. W analizie wyników brano pod uwagę zasięg strugi, kąt rozwarcia stożka strugi, powierzchnię strugi oraz ich warstwice.

Słowa kluczowe: wtrysk, rozpylenie, rozpylacze, biopaliwa rzepakowe

Abstract

The subject of this paper is an analysis of the possible improvement in the spraying process of biofuels – unprocessed rape oil and fatty acid methyl esters were taken into consideration, and obtained results were related to conventional fuel. Two types of nozzles, which have a different in number of holes and its diameters, were used during investigation. Fuel injection was recorded thanks to EVS 513D (Engine Video System) by AVL, which allows to detailed analysis of process. During such analysis penetration of the fuel stream, fuel stream's angle, fuel stream's surface and contour lines of fuel stream were taken into consideration.

Keywords: injection, spraying, nozzles, rape seed biofuels

* Dr hab. inż. Marek Idzior, prof. PP, dr inż. Wojciech Karpiuk, mgr inż. Maciej Bieliński, mgr inż. Tomasz Borowczyk, mgr inż. Paweł Stobnicki, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska.

1. Wstęp

W celu poprawienia, wymieszania paliwa z powietrzem coraz częściej w nowo konstruowanych układach zasilania wykorzystuje się rozpylacze o zwiększonej liczbie otworów. Obecność dodatkowych strug skutkuje lepszym rozprzestrzenianiem się wypływającego paliwa w komorze spalania. Przy zwiększaniu liczby otworków zwiększa się tym samym wielkość sumarycznego przekroju przepływowego paliwa z rozpylacza. Dlatego też należy pamiętać o zmniejszeniu średnicy każdego z otworków rozpylacza. Opisywane wielkości należy przy tym dobierać bezpośrednio do komory spalania – zmniejszenie średnic otworów powoduje zwiększanie prędkości wypływu strugi paliwa, co może skutkować jej wydłużeniem. Zwiększony zasięg czoła strugi może powodować trafianie cząstek paliwa na ścianki komory spalania, co w niekorzystny sposób odbija się na emisji związków szkodliwych.

W badaniach postanowiono sprawdzić wpływ liczby otworków rozpylających i_r, a tym samym ich średnicy d_o na osiągane parametry strug wybranych paliw. Przedmiotem przeprowadzonych badań był proces rozpylenia oleju rzepakowego nieprzetworzonego (OR), estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (EMKOR) i oleju napędowego (ON). Wykorzystano 2 rozpylacze, z czego jeden posiadał większą liczbę kanalików wylotowych (rozpylacz nr 7), ale jednocześnie średnica każdego z otworów była mniejsza w stosunku do otworków rozpylacza drugiego (rozpylacz 3). Zestawienie szczegółowe parametrów konstrukcyjnych obu rozpylaczy zamieszczono w tabeli 1.

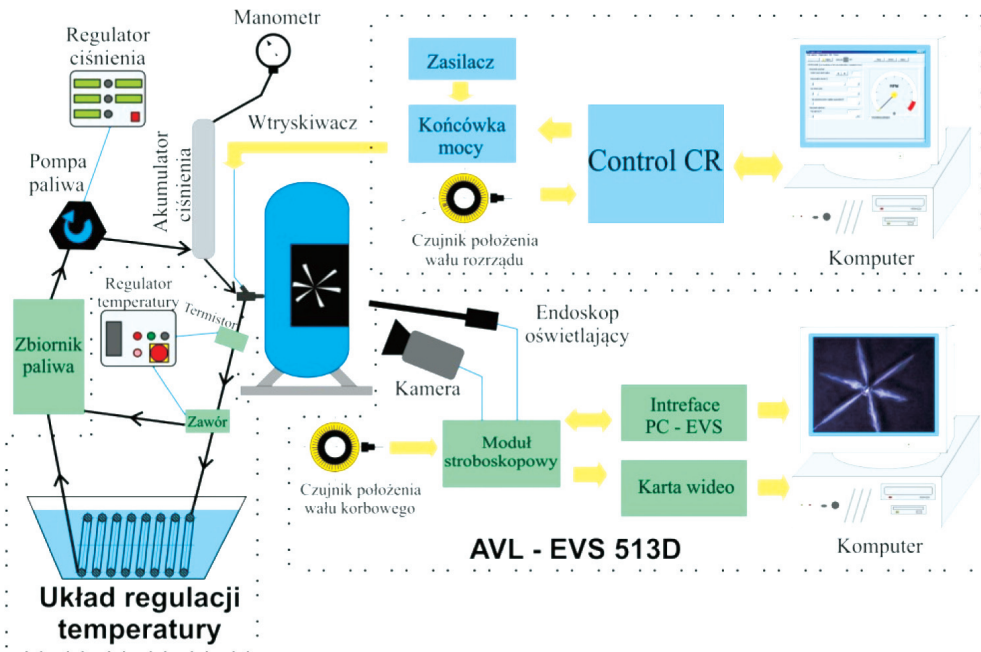
Tabela 1

Parametry konstrukcyjne i parametry pracy rozpylaczy nr 3 i 7
(kolorem zaznaczono rozpatrywane wielkości)

SPRAWDZANY PARAMETR								
oznaczenie rozpylacza	typ: St – studzienka BS – bez studzienki	liczba otworków rozpylających i_r	średnica otworu rozpylającego d_o [mm]	rodzaj wykonania kanalików wtryskowych: W – walcowe S – stożkowe	średnica gniazda przylgni iglicy d_g [mm]	typ wykonania iglicy: ścięcie na , 0,2 mm lub stożek na ř 1,1 mm [95°]	wartość wypływu hydraulicznego P = 10 MPa, t = 1min [cm^3/min]	ciśnienie początku pracy p_{otw} [Mpa]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
WYNIKI POMIARÓW								
3	BS	7	0,18	W	2,1	95°	1132	39,9
7	BS	10	0,15	W	2,1	95°	1161	38,5

2. Stanowisko badawcze

Podczas pomiarów na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku (rys. 1) rejestrowano rozpylenie paliw z wtryskiwacza umieszczonego w komorze otwartej, w której panowały warunki otoczenia. Posłużono się m.in. systemem EVS 513D (Engine Video System) produkcji AVL, który umożliwia rejestrację szybkozmiennych procesów fizycznych, dzięki specjalnie do tego przygotowanej kamerze. Układ pomiarowy wykorzystuje technikę stroboskopową. Oznacza to wykonywanie kolejnych zdjęć po wielu następujących po sobie cyklach wtrysku.



Rys. 1. Schemat stanowiska do badań wizualizacyjnych procesu rozpylenia

Fig. 1. Spraying visualization research stand

Kąt wtrysku, czas trwania impulsu elektrycznego otwarcia wtryskiwacza dla poszczególnych części dawek wtryskiwanego paliwa oraz inne parametry pracy zadawane były za pomocą programu Engine Control, który zainstalowano w komputerze zarządzającym systemem Control CR.

W badaniach użyty został układ z wysokociśnieniową pompą typu *common rail*. Zastosowana pompa była napędzana pasem zębatym za pomocą silnika elektrycznego, którego prędkość obrotową regulowano dzięki użyciu falownika prądu przemiennego. Sterowanie układem odbywało się dzięki wykonanemu na specjalnie zamówienie, elektronicznemu regulatorowi pracy układu typu *common rail*. Regulator, w którym zabudowano falownik prądu przemiennego służący do zmiany prędkości obrotowej silnika elektrycznego, posiada możliwość sterowania ciśnieniem wtrysku paliwa.

Stanowisko posiada ponadto możliwość regulowania i utrzymywania na stałym poziomie temperatury paliwa, co było istotne w związku z wykorzystaniem biopaliw. W tym celu użyty został termistorowy czujnik temperatury, za którym na przewodzie umieszczony został zawór regulacyjny, pozwalający na kierowanie paliwa w obieg grzany, bądź chłodzony. Sterowanie zaworem na podstawie wskazań termistora odbywało się w sposób automatyczny dzięki specjalnie do tego celu wykonanemu regulatorowi temperatury paliwa. Wartość temperatury wyniosła T_{wtr} = 55°C. Ciśnienie wtrysku każdego z użytych paliw wynosiło p_{wtr} = 40 MPa.

3. Wyniki badań

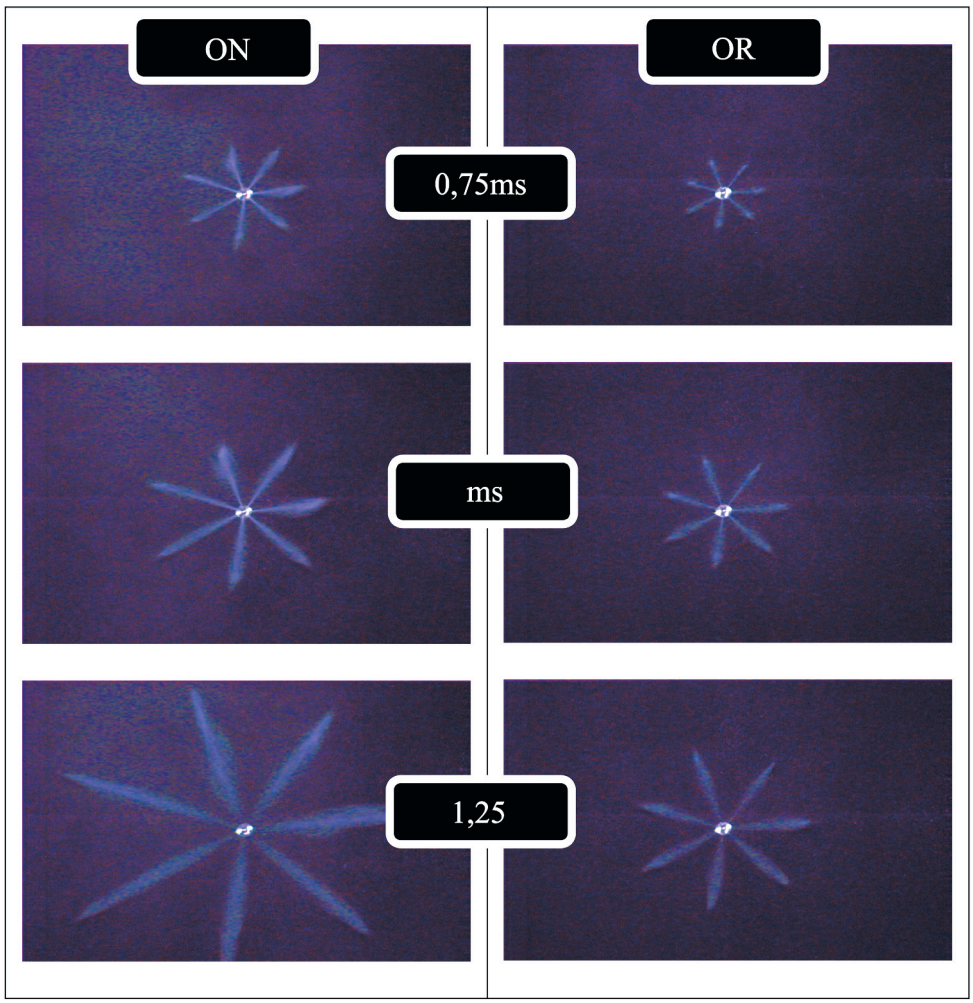
W analizie podjęto ocenę dwóch aspektów. W pierwszym z nich należało wziąć pod uwagę wpływ paliwa, w drugim natomiast wpływ konstrukcji rozpylacza na osiągane parametry rozpylanych strug. Wnioskowanie odbywało się przez łączenie ze sobą dwóch powyższych aspektów.

Porównując proces wtrysku dwóch najbardziej różniących się właściwościami fizykochemicznymi paliw (ON i OR), można zauważyć pewne różnice już przy jego inicjacji. Na rysunku 2 przedstawiono kilka stanów rozprzestrzeniania się strug. Widoczne są zdjęcia 0,75; 1 i 1,25 ms po wysłaniu sygnału sterującego uniesieniem iglicy. Po lewej stronie przedstawiono strugi oleju napędowego, po stronie prawej natomiast – oleju rzepakowego. Warunki porównania dla obu paliw były takie same.

Strugi oleju rzepakowego, niezależnie od konstrukcji rozpylacza, charakteryzuje występowanie opóźnienia wtrysku. Opóźnienie to, stwierdzone na podstawie porównania czasów, w jakich pojawiały się strugi paliw, wynosiło około 0,3 ms w stosunku do oleju napędowego i rzutowało na cały proces rozpylenia – występowało również opóźnienie w rozprzestrzenianiu się strug OR. Ostatni rząd zdjęć ukazuje występowanie opóźnienia i wydłużenia czasu wtrysku biopaliwa – strugi ON nie wypływają już z kanalików wylotowych podczas, gdy strugi OR w tym czasie są wciąż wtryskiwane. Przypuszcza się, że wielkość opóźnienia zależeć będzie od ciśnienia wtrysku, co zostanie sprawdzone w dalszej części analizy. Podobne zjawisko występowało podczas użycia paliw estryfikowanych. Wielkość opóźnienia w tym przypadku była mniejsza niż to jakie występowało przy wtrysku OR.

Duża lepkość paliw roślinnych powoduje zwiększanie się oporów przepływu paliwa m.in. przez przewody wtryskowe oraz kanaliki wtryskiwacza. Tłoczenie paliw rzepakowych skutkuje również wzrostem oporów ruchu poruszających się elementów układu zasilania, takich jak np. iglice rozpylaczy. Zjawiska te są prawdopodobną przyczyną występowania opóźnienia w początku wtrysku. Ze względu również na wysoką ściśliwość olejów roślinnych upłynąć musi więcej czasu zanim iglica rozpylacza zostanie uniesiona. Sytuacja taka dotyczy jednak głównie układów zasilania starszego typu i prawdopodobnie nie miała istotnego znaczenia w systemie typu *common rail*, który został wykorzystany w trakcie analizy.

Na zdjęciach widoczne są ponadto różnice w intensywności kolorów. Strugi ON są bardziej wyraziste w stosunku do bledszych strug OR. Jest to także związane z odmiennym czasem wtrysku obu paliw. Czas wtrysku pojedynczej strugi oleju rzepakowego był o 0,2 ms dłuższy w stosunku do czasu wtrysku oleju napędowego. Rzutowało to na intensywność świecenia, gdyż na pojedynczym zdjęciu biopaliwa było mniej – jego dawka była bardziej rozłożona w czasie.



Rys. 2. Rozprzestrzeniania się strug ON (lewa strona) i OR (prawa strona) – rozpylacz 3

Fig. 2. Distibution of fuel streams – diesel fuel (left side), rape seed oil fuel (right side) – nozzle 3

Inną zaobserwowaną cechą jest różnica w kształcie strug. Zarówno strugi paliw estryfikowanych, jak i oleju rzepakowego charakteryzowało występowanie zwężenia i wydłużenia stożków. Zjawisko to powodowane jest najprawdopodobniej zwiększoną lepkością i gęstością tych paliw w stosunku do oleju napędowego. Na zaprezentowanych zdjęciach strugi OR są krótsze – wynika to z faktu porównywania ich ze strugami ON po tym samym czasie od wysłania impulsu sterującego wtryskiwaczem. W sytuacji zestawienia zasięgów czół strug obu paliw przy przyjęciu za początek porównania chwili, w której paliwo pojawia się w otworkach rozpylacza (tj. nie uwzględniając opóźnienia w tłoczeniu) widoczne jest, że strugi biopaliw są dłuższe od strug paliwa konwencjonalnego. Dokładna analiza parametrów makrostrukturalnych potwierdziła zaobserwowane cechy.

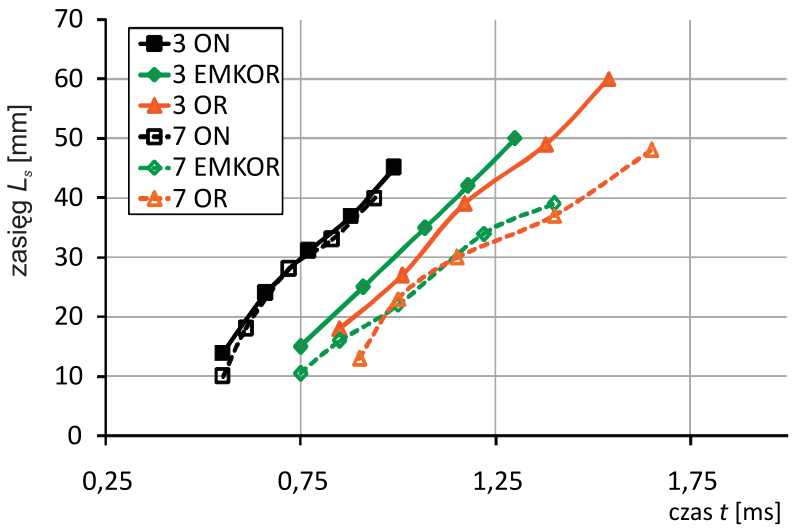
Podczas analizy wyników badań rozpatrywano parametry fizyczne strug paliwa; mierzono zasięgi L_s oraz kąty rozwarcia stożków strug α_s. Dokonano także pomiarów objętości obszaru, jaki zajmuje struga podczas wtrysku do komory badawczej. Wykorzystywano przy tym numeryczny program PatEV (ang. *Picture Analysis and Transformation for Engine Observation* [1]), pozwalający na dokładną analizę zdjęć uzyskanych podczas badań wizualizacyjnych. Uważa się, iż natężenie odbitego światła jest proporcjonalne do stężenia paliwa w strudze [2]. W związku z tym podczas analizy wykonanych zdjęć brano pod uwagę tylko parametr dotyczący luminancji (L). Z tego względu, za pomocą programu PatEV, rozpatrywane fotografie zostały przetransformowane do postaci monochromatycznej, a więc takiej, w której barwa oraz nasycenie przyjmują wartości zerowe, a jedynym zmiennym parametrem jest luminancja. Założono przy tym, że większe wartości L odpowiadają miejscom, w których mamy do czynienia z większym nagromadzeniem paliwa widocznym na wykonanym zdjęciu. Pierwszą czynnością zrealizowaną podczas analizy było wydzielenie obszarów zawierających strugi paliwa. Następnie należało tak dobrać zakres parametru L, aby minimum wartości oznaczało granice strugi, natomiast maksimum powodowało pokrycie całej strugi, jednak bez zbytniej nadwyżki. Dobór $L_{\min}$ pozwolił na wyznaczenie konturu poszczególnych strug. Znając granicę tej warstwicy można było przystąpić do pomiaru zasięgu L_s oraz kąta rozwarcia stożka α_s każdej ze strug. Zasięg (stopień penetracji) strugi jest to długość strugi w kierunku osiowym [3]. Pomiarów długości strug dokonano mierząc odcinek od otworka rozpylacza do końca strugi, a wyniki tych pomiarów otrzymano w mm. Kąt rozwarcia stożka strugi α_s, czyli kąt wierzchołkowy strugi kropel [3] zmierzono przy użyciu programu Screen Protractor, a otrzymane wyniki podano w stopniach.

Analiza poszczególnych zdjęć miała charakter porównawczy. Pomiaru parametrów makrostrukturalnych dokonano dla każdej strugi wykorzystanych paliw. Strugi paliw porównywano na zdjęciach odpowiadających jednakowym parametrom wtrysku (ciśnienie wtrysku p_{wtr}) oraz przy porównywalnych fazach wtrysku reprezentowanych czasem mierzonym od wysłania impulsu sterującego uniesieniem iglicy. Z zarejestrowanych zdjęć w następnym kroku wybrano te, które zostały poddane analizie – rozpatrywano 5 punktów pomiarowych każdego z wtrysków paliw. Pomiary parametrów makrostrukturalnych każdej ze strug wprowadzono następnie do arkusza kalkulacyjnego. Pozwoliło to na wyciągnięcie średniej arytmetycznej rozpatrywanego parametru (np. zasięgu) z każdego ze zdjęć dla danej fazy wtrysku. Kolejnym krokiem było wyciągnięcie średniej arytmetycznej ze wszystkich strug wypływających w danej chwili wtrysku z otworków rozpylacza. Uzyskano w ten sposób jedną, uśrednioną ze wszystkich strug, wartość rozpatrywanego parametru reprezentującą jedną fazę wtrysku dla każdego z badanych paliw.

Z przedstawionego wykresu zmiany zasięgu czoła strugi L_s w funkcji czasu wtrysku (rys. 3) wynika, że bez względu na rodzaj zastosowanego rozpylacza, najdłuższą strugą w każdym z punktów pomiarowych charakteryzował się olej rzepakowy. Proporcjonalnie do spadku lepkości zmniejszała się długość strug. Tym samym zasięg czoła strugi paliwa rzepakowego estryfikowanego zbliżony był do zasięgu strugi oleju napędowego. Średni zasięg strug OR w stosunku do średniego zasięgu strug ON w zależności od rozpylacza był większy o około 15–25% (średnie zasięgi wyliczone ze wszystkich punktów pomiarowych). Analogiczne różnice pomiędzy EMKOR i ON wynoszą maksymalnie 11%.

Biorąc natomiast pod uwagę wpływ konstrukcji rozpylacza można stwierdzić, że dłuższe strugi występowały w rozpylaczu 3 posiadającym większe średnice otworków wylotowych. Przy jego zastosowaniu, w zależności od paliwa, następował wzrost zasięgu od 15 do 35%. Za-

uważono ponadto brak różnic w długościach średniego zasięgu oleju napędowego wtryskiwanego z rozpylacza 3 oraz średniego zasięgu oleju rzepakowego wtryskiwanego z rozpylacza 7. Analogicznie – średni zasięg strug EMKOR tworzonych przy użyciu rozpylacza 7 był o około 20% mniejszy od średniego zasięgu ON wtryskiwanego za pomocą rozpylacza 3.



Rys. 3. Zmiana zasięgu strugi L_s analizowanych paliw w funkcji ich czasu wtrysku t zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

Fig. 3. Changes in fuel streams penetration L_s versus time (nozzle 3 and 7)

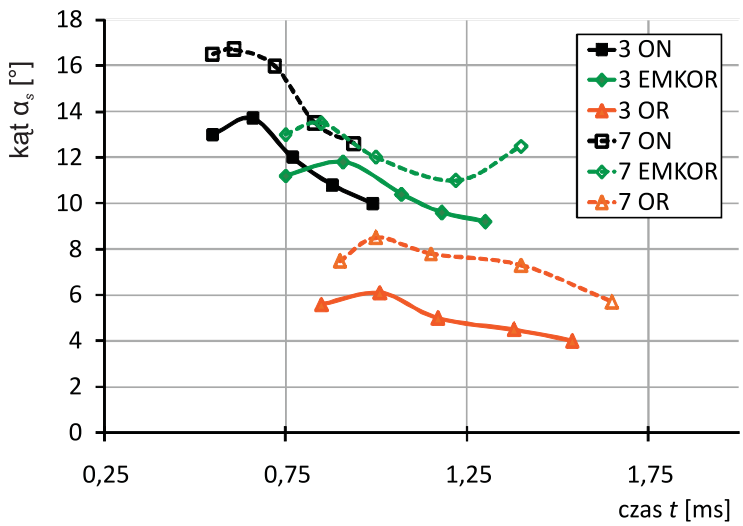
Przy zmniejszonej średnicy otworu wylotowego rozpylacza 7 zwiększa się prędkość wypływu paliwa na krawędzi rozpylacza. Powoduje to stosunkowo szybki rozpad wtórny kropli, wzmacniany dodatkowo oporem aerodynamicznym ośrodka, do którego realizowany jest wtrysk. Zmniejszające się średnice kropel pozwalają na lepsze ich mieszanie z powietrzem. W przypadku rozpylacza 3 otwory o większych średnicach utrudniają rozbijanie paliwa na mniejsze części. Krople o zwiększonej średnicy to tym samym krople cięższe. Przekłada się to na ich energię kinetyczną, co w rezultacie zwiększa penetrację strugi. Zjawisko to uwidaczniane jest w rozpylaczu 3 wyraźnym zwiększeniem zasięgu strug paliwa, w przybliżeniu w połowie trwania wtrysku.

Na wykresie dotyczącym zmiany zasięgów strug widoczne jest również przesunięcie początku wtrysku jakie występowało przy zasilaniu układu olejem rzepakowym. Potwierdza to zależności prezentowane na nieobrobionych zdjęciach. Widoczne są ponadto pewne różnice w czasie wtrysku, wynikające bezpośrednio z ustawienia czasu trwania impulsu. Najdłuższym wtryskiem charakteryzowała się więc struga oleju rzepakowego, najkrótszym natomiast – struga oleju napędowego.

Właściwość tę można zauważyć również w trakcie analizy wykresów dotyczących kątów stożków strug paliw (rys. 4). Występuje tutaj ponadto różnica w wielkości kątów w zależności od zastosowanego paliwa. Największym kątem charakteryzowały się strugi oleju napędowego. Podobne, ale niższe wartości osiągało paliwo estryfikowane. Różnica pomiędzy

średnim kątami stożków strug tworzonymi przez ON i EMKOR w poszczególnych fazach, wynosiła w zależności od rozpylacza około 15%. Bardziej zauważalne różnice, wynoszące nawet 50% zaobserwowano w porównaniu rozwarcia stożków strug ON i OR – olej rzepakowy nieprzetworzony tworzył najwęższe strugi.

W miarę propagacji strug, ich kąty we wszystkich przypadkach po początkowym zwiększeniu malały. Charakter przebiegu krzywych zachowany był dla obu analizowanych rozpylaczy. Większe kąty stożków strug osiągane były w strugach wtryskiwanych z rozpylacza 7 – w stosunku do rozpylacza 3 w zależności od paliwa średnie kąty stożków strug były większe o 19–42%. W analizie wykresu zwraca ponadto uwagę fakt zbliżonych wartości kątów stożków strug ON wtryskiwanego z rozpylacza 3 i EMKOR wtryskiwanego przy użyciu rozpylacza 7.

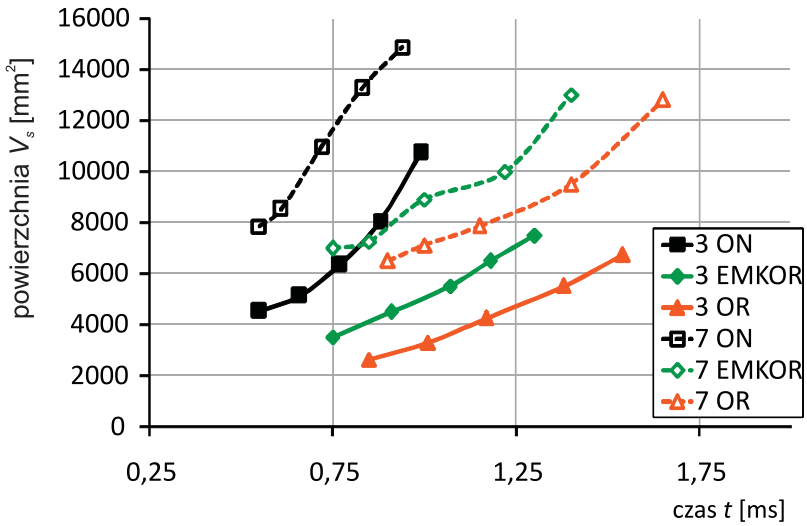


Rys. 4. Zmiana kąta stożków strug α_s analizowanych paliw w funkcji ich czasu wtrysku *t* zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

Fig. 4. Changes in fuel streams angle α_s versus time (nozzle 3 and 7)

Kolejnym analizowanym parametrem makrostrukturalnym, podobnie jak w przypadku wstępnych badań pozasilnikowych, była powierzchnia strug. Wielkość ta wiąże ze sobą zasięgi i kąty stożków strug. Można założyć, że im większa powierzchnia strugi, tym lepiej paliwo miesza się z powietrzem, co bezpośrednio wpływa na emisję związków toksycznych. Porównując strugi z uwagi na zastosowany rozpylacz zauważono w każdym z paliw, że znacznie większą powierzchnią całkowitą wszystkich strug charakteryzuje się rozpylacz 7. Wynika to z faktu większej liczby otworków w tym rozpylaczu. Oprócz różnic w całkowitej powierzchni strug wypływających z rozpylaczy widoczne są również zmiany w powierzchni pojedynczych strug. W zestawieniu zamieszczonym na rysunku 5 zaobserwowano, że pojedyncze strugi wypływające z rozpylacza 7 są większe od strug tworzonych przez rozpylacz 3. Średnia powierzchnia pojedynczych strug wyliczona ze wszystkich punktów pomiarowych w zależności od paliwa była od 35 do 48% większa podczas użycia rozpylacza 7. Zauważono ponadto, że średnia powierzchnia pojedynczych strug paliwa rzepakowego OR przy zasto-

sowaniu rozpylacza 7 była nieznacznie większa w stosunku do powierzchni pojedynczych strug paliwa konwencjonalnego wypływającego z rozpylacza 3. Niewątpliwie więc, zmniejszenie średnic otworków pozytywnie wpływało na makrostrukturę strug paliwa. Dodatkowym korzystnym aspektem było zwiększenie liczby otworków w rozpylaczu, co również w zdecydowany sposób powiększało całkowitą powierzchnie wypływających strug.



Rys. 5. Zmiana powierzchni strug V_s analizowanych paliw w funkcji ich czasu wtrysku t zrealizowana rozpylaczami nr 3 i 7

Fig. 5. Changes in fuel streams surface V_s versus time (nozzle 3 and 7)

Ocena zaprezentowana na rysunku 5 wykazała ponadto, że największą powierzchnią cechuje się olej napędowy. Mniejszą powierzchnię posiadały strugi estrów metylowych oleju rzepakowego – średnia różnica w stosunku do ON wynosiła około 15%. Najmniejszą powierzchnię rozpylenia tworzyło nieprzetworzone biopaliwo. Średnia powierzchnia pojedynczych strug OR w obu rozpylaczach była mniejsza w stosunku do powierzchni pojedynczych strug ON o 30% (rozpylacz 3) i 20% (rozpylacz 7).

Zwiększona prędkość wypływu, którą osiągnięto na drodze zmniejszenia średnic kanalików wtryskowych, pozwalała na uzyskiwanie mniejszych kropel, które łatwiej ulegały wymieszaniu z powietrzem. Warunki te osiągane przy zastosowaniu rozpylacza 7 sprzyjały zwiększaniu zarówno kątów stożków strug, jak i ich powierzchni. Aby szczegółowo przeanalizować intensywność wymieszania paliwa i powietrza, należało wykonać ocenę mikrostrukturalną strug. Dokonano tego w drugim etapie porównania obu rozpylaczy.

Analiza polegała na szacowaniu koncentracji paliwa wypływającego z rozpylaczy nr 3 i 7 – dzielono obraz strugi na podobszary charakteryzujące się określoną intensywnością świecenia (luminancją), czemu przypisuje się odpowiednią koncentrację paliwa. Ze względu na stroboskopowy charakter pracy kamery nie można było porównywać koncentracji odmiennych paliw. Związane jest to z różnym czasem ich wtrysku zmienianym dla zachowania dawki. Wydłużanie czasu wtrysku, jak miało to miejsce w przypadku wykorzystania biopaliw powoduje, że na pojedynczym rejestrowanym zdjęciu nagromadzonego w danej chwili

paliwa jest mniej. W związku z powyższym, do sprawdzenia możliwości zmiany mikrostruktury z wykorzystaniem dwóch różnych rozpylaczy zdecydowano się przeprowadzić pomiary tylko na paliwie konwencjonalnym. Sprawdzano tym samym tylko tendencje zmian, jakie zachodziły w strukturze strug rozpylanych przez dwa różne rozpylacze, pomijając wpływ paliwa na jego mikrostrukturę.

Za pomocą programu PatEV rozpatrywane zdjęcia przekształcone zostały do postaci monochromatycznej. Tak jak w przypadku badania parametrów makrostruktury (zasięgu i kąta) również tu, w ten sam sposób wydzielono granice strug i wyznaczono zakres parametru luminancji. Otrzymany zakres świecenia światłem odbitym podzielono następnie na 4 przedziały tzw. warstwice. Każda z warstwic była reprezentowana na zdjęciach strugi odrębnym kolorem. W tablicy 2 zestawiono zakres badań, dla których wykonano analizę wraz ze zdefiniowanymi warstwicami. Obszary o największej intensywności świecenia światłem odbitym to obszary oznaczone kolorem czerwonym (warstwica nr 3). Mniejsza intensywność świecenia była reprezentowana przez warstwicę koloru żółtego (2), a jeszcze mniejsza przez kolor zielony (1). Warstwica o najmniejszych wartościach luminancji to warstwica w kolorze niebieskim (0). Program PatEV udostępnia informacje o wielkości poszczególnych warstwic.

Tabela 2

Definicje granic warstwic wyznaczonych podczas analizy z wykorzystaniem programu PatEV

Nazwa	Luminancja L	Barwa H	Nasycenie S	Kolor
warstwica 0	40–60	0	0	niebieski
warstwica 1	61–80	0	0	zielony
warstwica 2	81–95	0	0	żółty
warstwica 3	96–110	0	0	czerwony

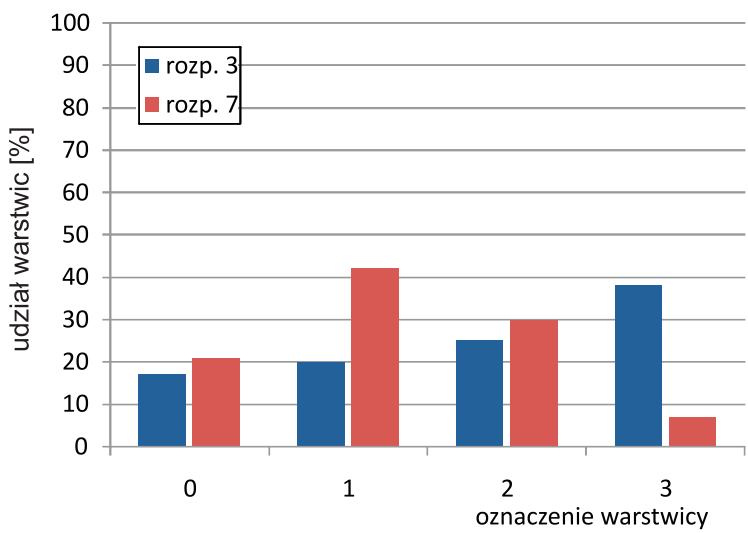
Procedura oceny wykonanych zdjęć miała charakter porównawczy – powierzchnię czterech wydzielonych warstwic zmierzono dla wtrysku z rozpylacza 3 i 7 w pięciu różnych jego fazach, przy czym dla każdego etapu procesu wykonano po cztery zdjęcia, by móc następnie ustalić średni rozmiar każdej z warstwic. Następnie dokonano porównania wielkości względnych warstwic – powierzchnię, która jest objęta daną warstwicą, odniesiono do powierzchni całkowitej strugi i wyrażono w procentach. Operacja ta była konieczna ze względu na różne powierzchnie porównywanych strug w analizowanych etapach wtrysku, wynikające z odmiennej konstrukcji (liczba otworków) wykorzystanych rozpylaczy. Wyniki z podziałem na warstwice przedstawiono za pomocą wykresów słupkowych dla jednej fazy wtrysku $t = 0{,}7$ ms po wysłaniu impulsu sterującego uniesieniem iglicy (rys. 6). W przyjętym punkcie strugi paliwa były rozwinięte w sposób wystarczający do przeprowadzenia pomiaru, a przedstawiony wykres jest reprezentatywny dla całego procesu. Analiza ta pozwoliła na konfrontację wielkości warstwic obu rozpylaczy w tej samej chwili wtrysku.

Warstwica 3 charakteryzuje te obszary strugi, które posiadają największą intensywność świecenia światłem odbitym, co odpowiada największej koncentracji paliwa. Występowanie tej warstwicy jest niekorzystne, gdyż świadczy o znacznym nagromadzeniu paliwa w strudze oraz nierównomierności w wymieszaniu paliwa z powietrzem. Obszary oznaczone w strudze jako warstwica nr 3 są miejscami, w których występować mogą podczas spalania lokalne niedobory tlenu.

Jak widać, na wykresie przedstawionym na rysunku 6 strugi wypływające z rozpylacza 3 charakteryzują się znacznym udziałem warstwicy nr 3, podczas gdy w rozpylaczu 7 warstwica ta zajmuje zaledwie 7% całkowitej powierzchni strug. Największe udziały w strugach oleju napędowego wypływającego z rozpylacza 7 stanowiły warstwice nr 1 i 2, odpowiednio 42 i 30%. Świadczy to o dobrym wymieszaniu paliwa z powietrzem podczas użycia tego rozpylacza. Przypuszczać można, że średnia średnica kropel jest tu mniejsza w stosunku do tych jakie tworzone są przez rozpylacz 3. Ułatwia to uzyskanie szerszego kąta rozwarcia stożka strugi, co widoczne było przy ocenie parametrów makrostrukturalnych.

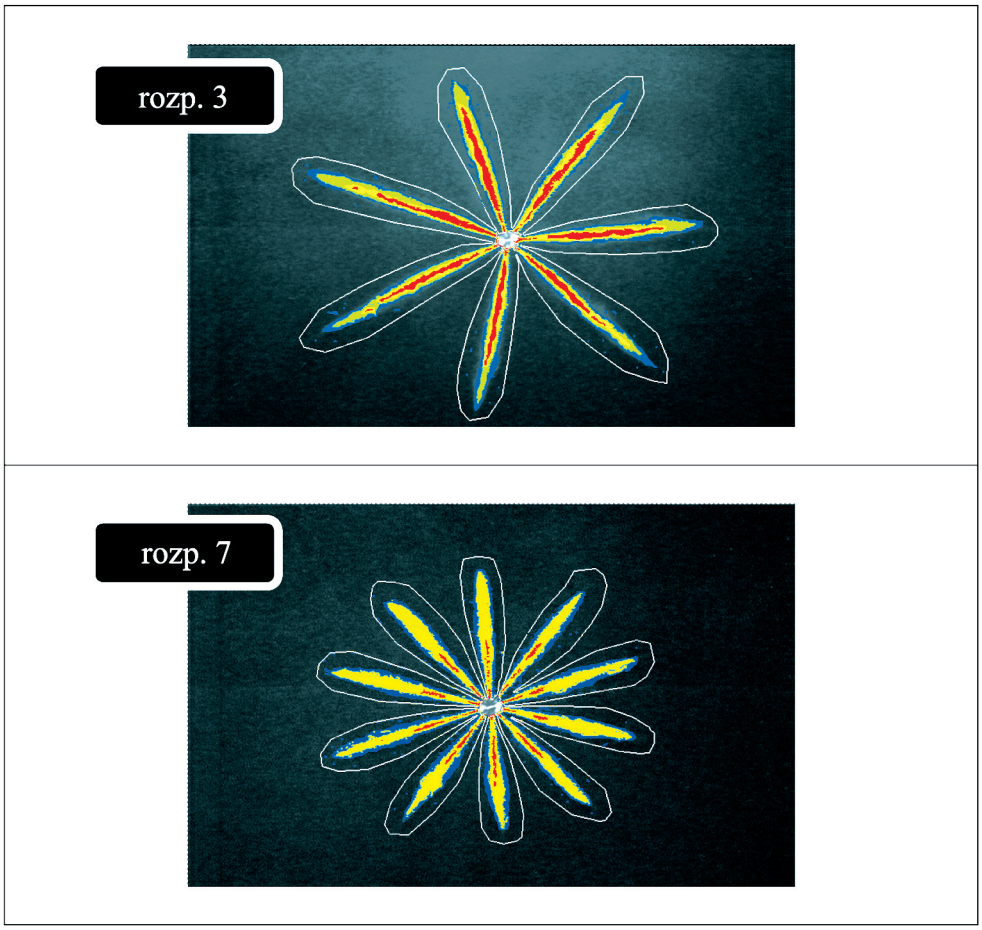
We wszystkich zdjęciach strug, których powierzchnie zostały podzielone na warstwice, zauważono charakterystyczne rozmieszczenie warstwic. Warstwica charakteryzująca się największą intensywnością świecenia światłem odbitym występuje w rdzeniu strugi i jest otoczona kolejnymi warstwicami o mniejszym stopniu luminancji. Większym rdzeniem charakteryzowały się strugi tworzone przez rozpylacz 3. Zauważono ponadto, że zmniejszanie minimalnej wartości parametru luminancji powoduje powiększanie rejestrowanego obszaru strugi. Zależności te widoczne są najlepiej podczas wizualnego porównania strug tworzonych przez rozpylacze. Przykładowe zdjęcia wtrysku generowanego przez rozpylacz 3 i 7 przedstawiono na rysunku 7.

Poza zdecydowanymi różnicami w intensywności nagromadzenia paliwa w strugach zdjęcia ukazują wszystkie cechy zmierzone podczas analizy makrostruktury. Strugi rozpylacza 3 charakteryzują się większym zasięgiem, ich stożki są bardziej zwężone, a powierzchnia jest mniejsza w stosunku do powierzchni strug paliwa wtryśniętego z rozpylacza nr 7.



Rys. 6. Porównanie rozmiarów warstwic w strugach ON generowanych w tej samej chwili wtrysku z użyciem rozpylaczy 3 i 7

Fig. 6. Comparison of contour lines in streams of diesel fuel (nozzle 3 and 7)



Rys. 7. Przykładowe zdjęcia procesu rozpylenia ON realizowanego przez rozpylacz 3 (góra) i rozpylacz 7 (dół)

Fig. 7. Exemplary shots of diesel fuel spraying process (nozzle 3 – upper, nozzle 7 – lower)

Można stwierdzić, że dąży się do zwiększania powierzchni strug, w założeniu bowiem poprawia to wymieszanie paliwa z powietrzem. Nie zawsze jednak wskazane jest, by wielkość powierzchni pojedynczej strugi była jak największa. Istotna jest również średnia średnica kropel występująca w strudze. Powierzchnię strug należy dobierać w powiązaniu ze średnicą otworków wylotowych. Większe otworki pozwalają na tworzenie większych strug, z drugiej jednak strony za duży wypływ paliwa oznacza zwiększone jego zużycie i sprzyja powstawaniu zbyt bogatej mieszanki, wzmagającej tym samym procesy tworzenia sadzy.

Sumaryczne pole przekroju poprzecznego otworków, wyliczone na podstawie wzoru (1), dla obu rozpylaczy jest takie same i wynosi około 0,178 mm^2. Mimo że otworków w rozpylaczu nr 7 jest więcej, to są one mniejszej średnicy.

$$S_s = i_r \cdot \frac{\Pi d_o^2}{4} \tag{1}$$

gdzie:

S_s – sumaryczne pole przekroju poprzecznego otworków rozpylacza [mm^2],
i_r – liczba otworków rozpylacza,
d_o – średnica otworu rozpylającego [mm].

Przy zwiększeniu liczby otworków z 7 do 10 bez redukcji ich średnic (przykład 2 w tab. 3), sumaryczne pole przekroju wzrasta o 0,076 mm^2. W sytuacji odwrotnej, tj. zwiększania średnicy otworów bez zwiększania liczby otworków, pole przekroju poprzecznego otworków wzrasta o 0,152 mm^2.

Tabela 3

Przykłady zmiany sumarycznego pola przekroju poprzecznego otworków w zależności od liczby otworków oraz ich średnicy

Lp.	Liczba otworków rozpylających i_r	Średnica otworu rozpylającego d_o [mm]	Sumaryczne pole przekroju poprzecznego otworków S_s [mm^2]
1	7	0,18	0,178
	10	0,15	0,177
2	7	0,18	0,178
	10	0,18	0,254
3	7	0,18	0,178
	7	0,245	0,330

4. Wnioski

Niekorzystne właściwości nieprzetworzonego oleju rzepakowego, takie jak zwiększona w stosunku do oleju napędowego lepkość oraz gęstość, w istotny sposób determinowały budowę rozpylanych strug biopaliwa. Ma to bezpośredni wpływ na osiągane przez silnik parametry emisji związków szkodliwych. W porównaniu do paliwa konwencjonalnego strugi OR cechowały się większym zasięgiem, mniejszym kątem rozwarcia stożków, oraz mniejszą powierzchnią. Właściwości te uznano za niekorzystne z punktu widzenia jakości rozpylenia, a tym samym przewidywanych parametrów emisyjnych. Strugi EMKOR charakteryzowały się parametrami, których wielkości zbliżone były do parametrów strug paliwa konwencjonalnego.

W przedstawionej analizie wykazano, że niekorzystne rozpylenie biopaliw (zwłaszcza OR) można w sposób skuteczny modyfikować na drodze wykorzystania odpowiedniej konstrukcji rozpylacza. Użycie rozpylacza o większej liczbie otworków rozpylających posiadających mniejsze średnice skutkowało poprawą parametrów tworzonych strug. Powierzchnia całkowita strug z uwagi na większą liczbę otworków była znacznie większa, przy czym również powierzchnia pojedynczych strug była większa w porównaniu do rozpylacza o większych otworkach. Zaobserwowane zmiany związane były najprawdopodobniej z rozmiarami kropel, co w pewnym stopniu potwierdziła analiza mikrostruktury rozpylanych strug.

Literatura

[1] Wisłocki K., *Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym*, Rozprawa nr 387, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
[2] Tindal M., Williams T., Harcombe A., *Fuel spray formation in an experimental swirl chamber*, SAE paper 870451.
[3] Orzechowski Z., Prywer J., *Rozpylanie cieczy*, WNT, Warszawa 1991.