Article citation info:
JAWORSKI, A., et al. Analysis of the influence of injection pressure in common rail system on spray tip penetration of the selected alternative fuels. *Combustion Engines*. 2013, **154**(3), 618-624. ISSN 0138-0346.

Artur JAWORSKI
Hubert KUSZEWSKI
Kazimierz LEJDA
Adam USTRZYCKI
Paweł WOŚ

PTNSS–2013–SC–108

Analysis of the influence of injection pressure in common rail system on spray tip penetration of the selected alternative fuels

Abstract: This article presents the research results of influence of injection pressure on the spray tip penetration of selected fuels such as diesel, biodiesel, rapeseed oil and mixtures of these fuels. The study was performed on a specially developed test stand with a Common Rail injection system, and at fuel injected into the chamber filled with research fuel. The study was made for a different pressures in the rail; for determination of spray tip penetration the AVL VisioScope system was used. The results was determined on the base of recorded pictures of injected fuel stream as a function of rotation angle of the high pressure pump shaft.

Keywords: *fuel injection, alternative fuels, spray tip penetration*

Analiza wpływu ciśnienia wtrysku w układzie common rail na zasięg strugi wybranych paliw zastępczych

Streszczenie: W artykule przedstawienio badania wpływu ciśnienia wtrysku na zasięg strugi paliwa dla wybranych paliw takich jak olej napędowy, biodiesel, olej rzepakowy oraz ich mieszaniny. Badania realizowano na specjalnie opracowanym stanowisku z układem zasilania typu Common Rail, przy wtrysku do komory wypełnionej badanym paliwem. Badania prowadzono dla różnych ciśnień w zasobniku, a do wyznaczenia zasięgu strugi użyto systemu VisioScope firmy AVL. Zasięg strugi określano na podstawie zarejestrowanych przebiegów w funkcji kąta obrotu wałka pompy wysokiego ciśnienia.

Słowa kluczowe: *wtrysk paliwa, paliwa alternatywne, zasięg strugi*

1. Wstęp

W związku z wyczerpywaniem się paliw kopalnych oraz w trosce o stan środowiska naturalnego coraz większe zainteresowanie budzą paliwa alternatywne, między innymi paliwa na bazie estrów metylowych (B100), jako samoistne paliwa silnikowe [8] lub oleje napędowe z dodatkiem biokomponentów o różnym stężeniu. Wszystkie parametry silnika o zapłonie samoczynnym, zarówno operacyjne, jak i ekologiczne zależą od przebiegu procesu spalania, na który główny wpływ ma proces wtrysku paliwa. Dokładność dawkowania oraz powtarzalność kolejnych procesów wtrysku wywiera podstawowy wpływ na jakość zachodzących w silniku procesów. Na te parametry ma wpływ wiele czynników, począwszy od konstrukcji i precyzji wykonania samego wtryskiwacza, który jest w głównej mierze odpowiedzialny za proces wtrysku paliwa, a skończywszy na właściwościach paliwa.

Odmienne właściwości paliw zastępczych w odniesieniu do standardowego oleju napędowego, mogą być powodem zmian w pracy układu wtryskowego i wynikających z tego różnic w makro- i mikrostrukturze rozpylanego w cylindrach silnika paliwa [2].

Proces wtrysku paliwa jest zjawiskiem krótkotrwałym, stąd też obserwacja tego procesu wymaga zastosowania odpowiednich technik rejestrowania tych szybkozmiennych zjawisk. Ich późniejsza analiza pozwala na szczegółową ocenę tych zjawisk, dając możliwość poznania sposobu rozprzestrzeniania się strug paliwa, ich kształtu oraz pozostałych parametrów jej makro- i mikrostruktury.

Badania wizualizacyjne, ze względu na rozwój cyfrowych technik rejestracji i przetwarzania obrazu, są coraz częściej stosowane w inżynierii silników spalinowych [7]. Umożliwiają obserwację procesu wtrysku i jego zaburzeń, pozwalając na takie projektowanie aparatury wtryskowej i systemu spalania, by zachodzące w silniku procesy były bardziej efektywne, co w konsekwencji prowadzi do poprawy parametrów operacyjnych i ekologicznych silnika spalinowego.

Celem prowadzonych badań zasięgu strugi było określenie w jakim stopniu zastosowanie paliwa alternatywnego, które może charakteryzować się parametrami znacznie odbiegającymi od paliwa standardowego, wpływa na proces wtrysku. Analizę przeprowadzono dla odmiennych parametrów wtrysku, a także przy zastosowaniu różnych wtryskiwaczy.

2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Zasadniczym celem badań było określenie zasięgu strugi paliwa dla paliw o różnych właściwościach fizykochemicznych. Ponieważ badaniom poddano paliwa mogące mieć destruktywny wpływ na stanowisko probiercze, w szczególności na jego system pomiarowy, opracowano odrębny system hydrauliczny z pomiarem przepływu opartym na czujnikach Coriolisa. Układ ten był niezależny od systemu stanowiska probierczego EPS-815 firmy Bosch, które było wykorzystywane jedynie do napędu pompy wysokiego ciśnienia. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono między innymi w pracy [3, 4].

Zasięg strugi określano na podstawie zarejestrowanych przebiegów w funkcji kąta obrotu wałka pompy (OWP). Przebiegi te rejestrowano za pomocą systemu wizualizacyjnego AVL VisioScope, zapewniającego filmowanie rozwoju strugi z rozdzielczością kątową wynoszącą 0,1° OWP.

Proces rozwoju strugi rejestrowano dla czasu wtrysku wynoszącego 3 ms oraz dla ciśnienia w układzie wynoszącego 75, 100 i 125 MPa oraz prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr/min. Badania prowadzono przy realizacji wtrysku jednofazowego, celem uniknięcia zmian w procesie dawkowania wynikających z wahań ciśnienia powstających przy wtrysku wielofazowym [1] oraz przy stałej wartości napięcia zasilającego [5]. Wartość temperatury paliwa w zbiorniku była utrzymywana na poziomie 40±2°C, a parametry sygnału sterującego były jednakowe dla wszystkich badanych wtryskiwaczy.

Tabela 1. Paliwa wykorzystane podczas badań wizualizacyjnych procesu wtrysku

Oznaczenie paliwa	Udział [% obj.]					
	Olej napędowy bez biododatków	Olej napędowy – gatunek F, zawierający do 5% FAME	Estry metylowe oleju rzepakowego – FAME	Rafinowany olej rzepakowy	Benzyna silnikowa Klasa lotności D/D1	Alkohol etylowy
	ON100	**ONH100**	**B100**	**OR100**	**G100**	**ET100**
ON100	100	-	-	-	-	-
B7	93	-	7	-	-	-
B20	80	-	20	-	-	-
B100	-	-	100	-	-	-
OR40	-	60	-	40	-	-
OR80	-	20	-	80	-	-
ORG30	-	-	-	70	30	-
ORET5G5	-	-	-	80	5	5

Tabela 2. Podstawowe parametry paliw wykorzystanych podczas badań [4, 6]

Oznaczenie paliwa	Gęstość[1] [kg/m^3]	Lepkość kinematyczna[2] [mm^2/s]	Wartość opałowa [kJ/kg]	Zawartość H_2O [ppm]
ON100	826	2,613	43043	58,28
B7	830	2,713	42680	52,47
B20	836	2,917	41956	91,89
B100	878	4,329	37247	235,28
OR40	866	7,841	40566	158,95
OR80	883	18,920	39375	273,43
ORG30	898	8,005	38345	364,77
ORET5G5	879	22,079	38059	356,12

[1] Gęstość mierzono w temperaturze 22 ºC, [2] Lepkość mierzono w temperaturze 40 ºC

W każdym punkcie pomiarowym rejestrowano proces wtrysku w przedziale odpowiadającym nastawionemu czasowi wtrysku tak, by zarejestrowany był cały przebieg tego wtrysku niezależnie od

rodzaju wtryskiwacza i paliwa, począwszy od początku wysterowania wtryskiwacza do momentu, w którym następował koniec wtrysku paliwa do komory wizualizacyjnej. Dla przyjętego czasu wtrysku kąt ten wynosił 35° OWP.

Badaniom wizualizacyjnym poddano osiem wybranych paliw (tabela 1), których podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 2.

W badaniach wykorzystano cztery wtryskiwacze sterowane elektromagnetycznie:

- pięciootworkowy – z silnika Fiat 1.3 MultiJet o oznaczeniu 0 445 110 083 (W083),
- pięciootworkowy – z silnika Peugeot 2.0 HDI o oznaczeniu 0 445 110 044 (W044),
- sześciootworkowy – z silnika Mercedes 2,3 CDI o oznaczeniu 0 445 110 089 (W189),
- pięciootworkowy – o oznaczeniu 0 445 110 083 z czujnikiem wzniosu iglicy (Wpom).

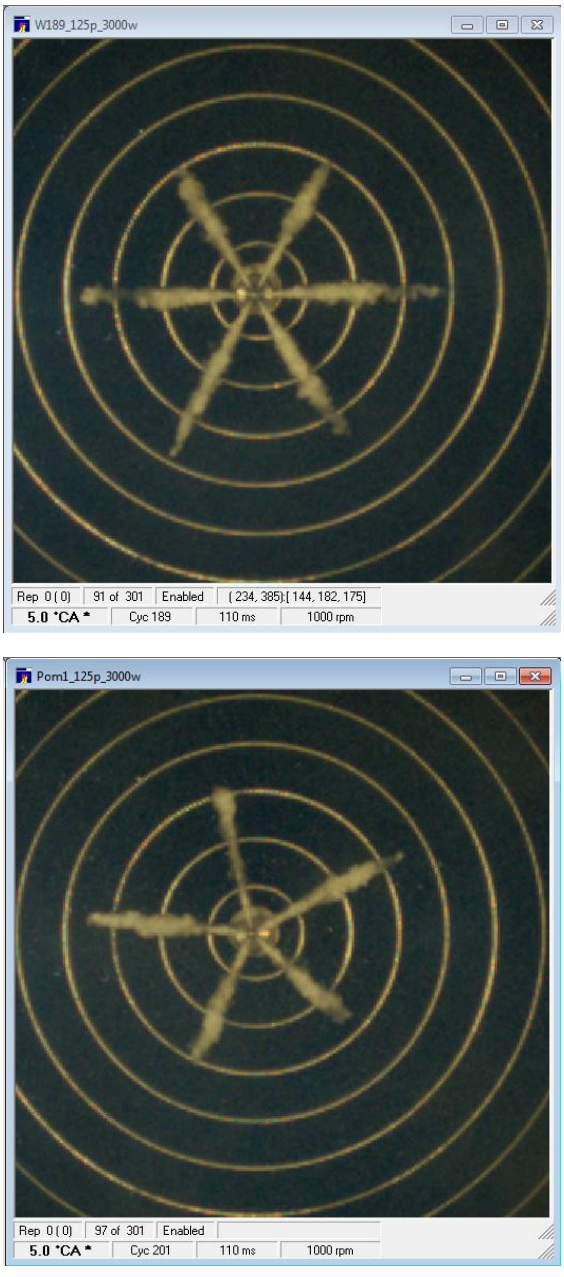
3. Wyniki badań

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano serie zdjęć (rys. 1), z których odczytano początki wtrysku oraz zasięg strugi. Za początek wtrysku uznawano kąt ze zdjęcia, dla którego na następnej fotografii można było zaobserwować strugę paliwa wypływającą z któregokolwiek otworka rozpylacza. Następnie, przy użyciu oprogramowania VisioScope, określano zasięg dla każdej strugi oddzielnie i obliczano wartość średnią zasięgu w funkcji kąta OWP. Na rys. 2 przedstawiono zmiany kąta początku wtrysku dla badanych wtryskiwaczy dla oleju napędowego bez biokomponetów. Jak widać, różnice są nieznaczne, przy czym w największym stopniu na zmiany ciśnienia reaguje wtryskiwacz W044, a w najmniejszym stopniu wtryskiwacz W083 i wtryskiwacz pomiarowy WPom, będący jego modyfikacją (zaimplementowany czujnik wzniosu iglicy).

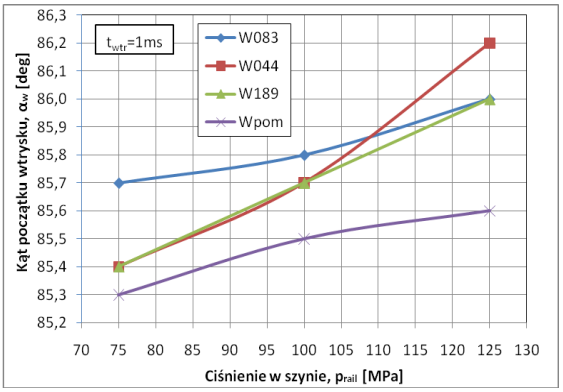
Wyniki badań zasięgu strugi dla badanych paliw i wtryskiwaczy, przy ciśnieniu wtryskiwanego paliwa 100 MPa oraz dla czasu wtrysku 3 ms, ilustrują rys. 3÷6.

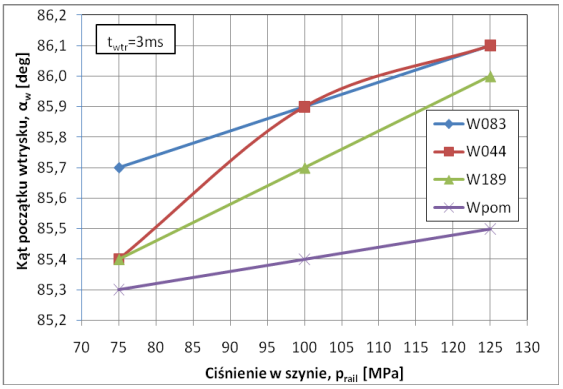
Najdłuższy średni zasięg strugi wtryskiwanego paliwa dla wtryskiwaczy WPom i W044 uzyskano dla ON bez biokomponentów (paliwo ON100). W przypadku wtryskiwaczy W189 i W083 średni zasięg strugi ON był tylko nieznacznie krótszy od średniego zasięgu strugi paliwa B20. Paliwa B7 i B20 mają bardzo zbliżony zasięg strugi do zasięgu strugi oleju napędowego ON100. Widoczne jest, że dla paliw ORET5G5 oraz OR80 średni zasięg strugi jest najkrótszy.

Różnice średniego zasięgu strugi pomiędzy paliwami ON100 oraz ORET5G5 kształtowały się następująco: dla wtryskiwacza W189 różnica ta wynosiła ok. 9,1 mm, dla wtryskiwacza W083 różnica ta wynosiła ok. 6,2 mm, dla wtryskiwacza WPom różnica ta wynosiła ok. 9,3 mm, natomiast dla wtryskiwacza W044 różnica ta była największa i wynosiła ok. 15 mm. Dla paliwa OR80, różnice średniego zasięgu strugi w odniesieniu do oleju ON100 były nieco mniejsze i wynosiły: dla wtryskiwacza W189 - 9,6 mm, dla wtryskiwacza W083 - 6,6 mm, dla wtryskiwacza WPom - 8,6 mm. Dla wtryskiwacza W044 różnica ta była największa i wynosiła ok. 10,3 mm. Wyraźny jest zatem wpływ wzrostu lepkości paliwa na obniżenie średniego zasięgu strugi, dla badanych wtryskiwaczy.

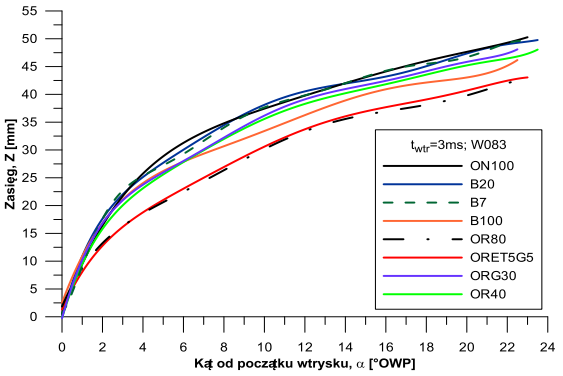


Rys. 1. Widok strug paliwa sfotografowany po 5° obrotu wałka pompy od rzeczywistego początku wtrysku dla dwóch badanych wtryskiwaczy W189 i Wpom (t_{wtr} = 3 ms, p_{rail} = 125 MPa, n = 1000 obr/min)

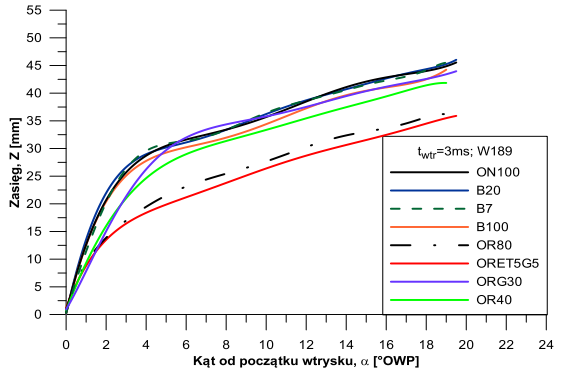




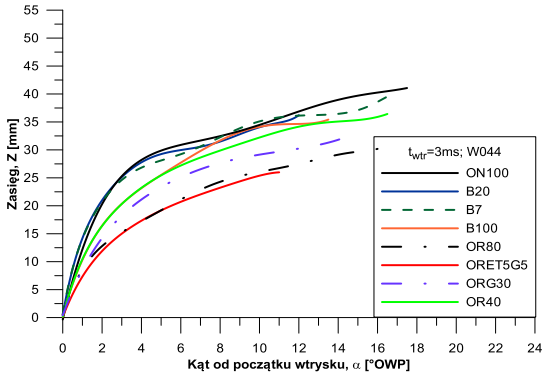
Rys. 2. Kąt początku wtrysku α_w dla paliwa ON100 i czterech badanych wtryskiwaczy w zależności od ciśnienia w szynie p_{rail} (n = 1000 obr/min)



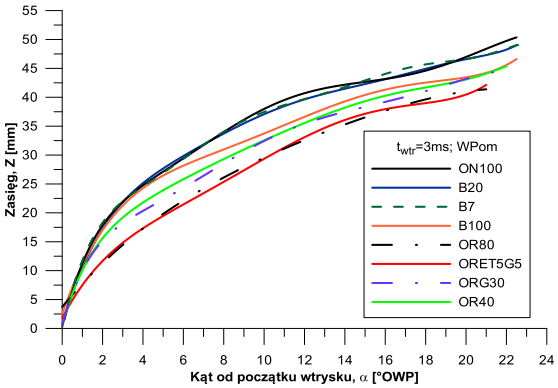
Rys. 3. Porównanie średniego zasięgu strugi dla wtryskiwacza W083 (p_{rail} = 100 MPa)



Rys. 4. Porównanie średnich zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza W189 (p_{rail} = 100 MPa)

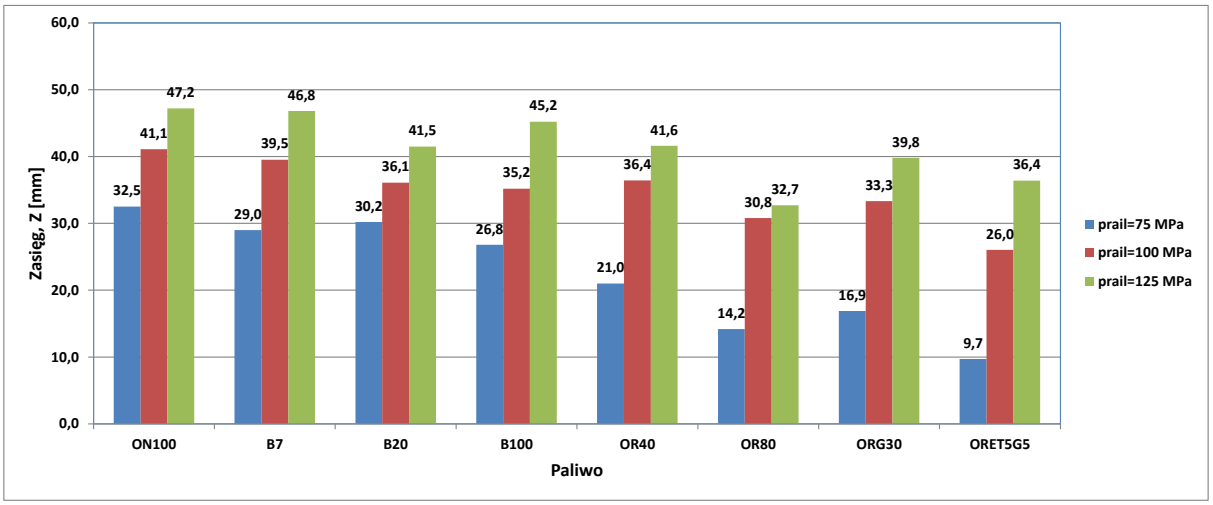


Rys. 5. Porównanie średnich zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza W044 (p_{rail} = 100 MPa)

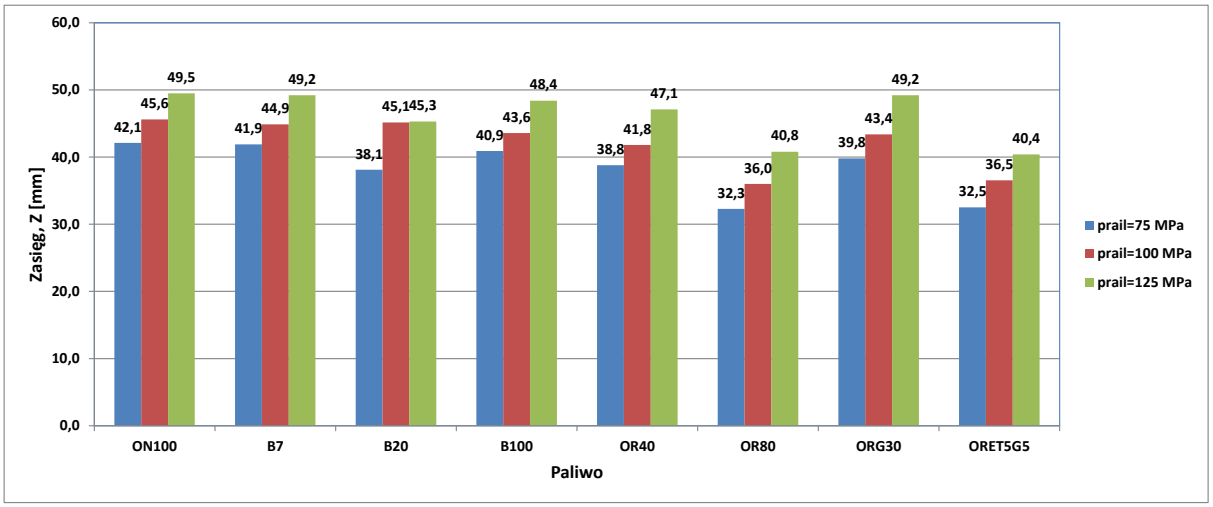


Rys. 6. Porównanie średnich zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza WPom (p_{rail} = 100 MPa)

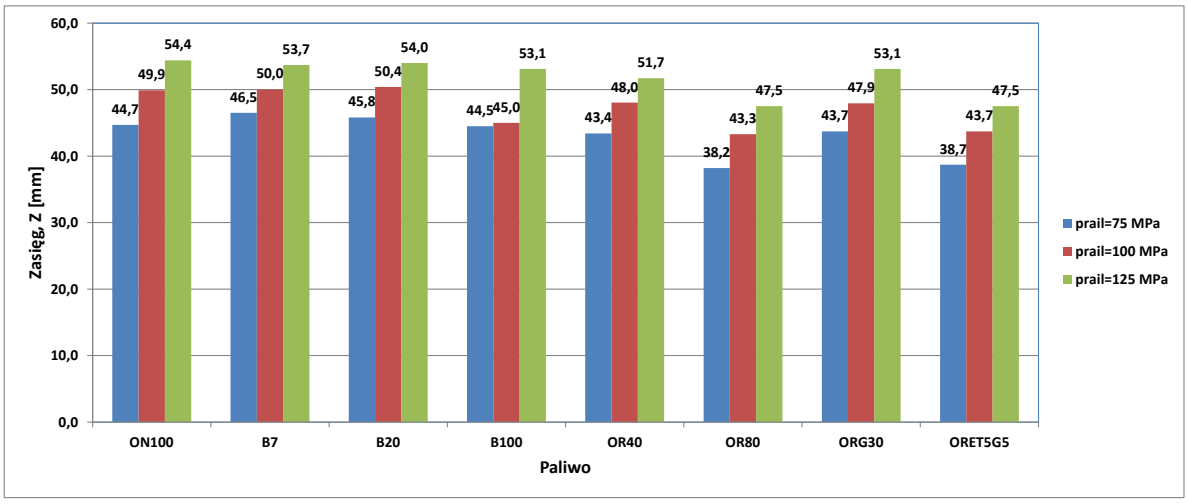
Wyniki maksymalnego zasięgu strugi dla badanych paliw przy ciśnieniach w szynie p_{rail} = 75 MPa, p_{rail} = 100 MPa oraz p_{rail} = 125 MPa przedstawiono na rys. 7÷10. Dla wtryskiwacza W044 (rys. 7) widoczny jest duży wpływ rodzaju paliwa na zasięg. Różnice zasięgu strugi w relacji do paliwa ON100, zależne są wyraźnie od ciśnienia w szynie. Zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, tj. im ciśnienie jest wyższe, tym różnice są mniejsze. Najkrótszy zasięg strugi odnotowano dla paliw OR80 i ORET5G5. Przy ciśnieniu w szynie p_{rail} = 125 MPa różnica zasięgu strugi paliwa ON100 i ORET5G5 wyniosła 10,8 mm, natomiast dla ciśnienia p_{rail} = 75 MPa – 22,8 mm. Różnice zasięgu strugi dla paliwa ON100 i OR80 przy ciśnieniach p_{rail} = 125 MPa oraz p_{rail} = 75 MPa wyniosły odpowiednio: 14,5 mm oraz 18,3 mm. Dla wtryskiwacza W189 (rys. 8) wpływ rodzaju paliwa na zasięg strugi był mniejszy niż dla wtryskiwacza W044. Najkrótszy zasięg strugi odnotowano również dla paliw OR80 i ORET5G5. Przy ciśnieniu w szynie p_{rail} = 125 MPa różnica zasięgu strugi paliwa ON100 i ORET5G5 wyniosła 9,1 mm, natomiast dla ciśnienia p_{rail} = 75 MPa – 9,6 mm. Różnice zasięgu strugi dla tego wtryskiwacza, dla wtrysku paliwa OR80 i ON100 przy ciśnieniach p_{rail} = 125 MPa oraz p_{rail} = 75 MPa wyniosły odpowiednio: 8,7 mm oraz 9,8 mm.



Rys. 7. Porównanie maksymalnych zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza W044 (t_{wtr} = 3ms)

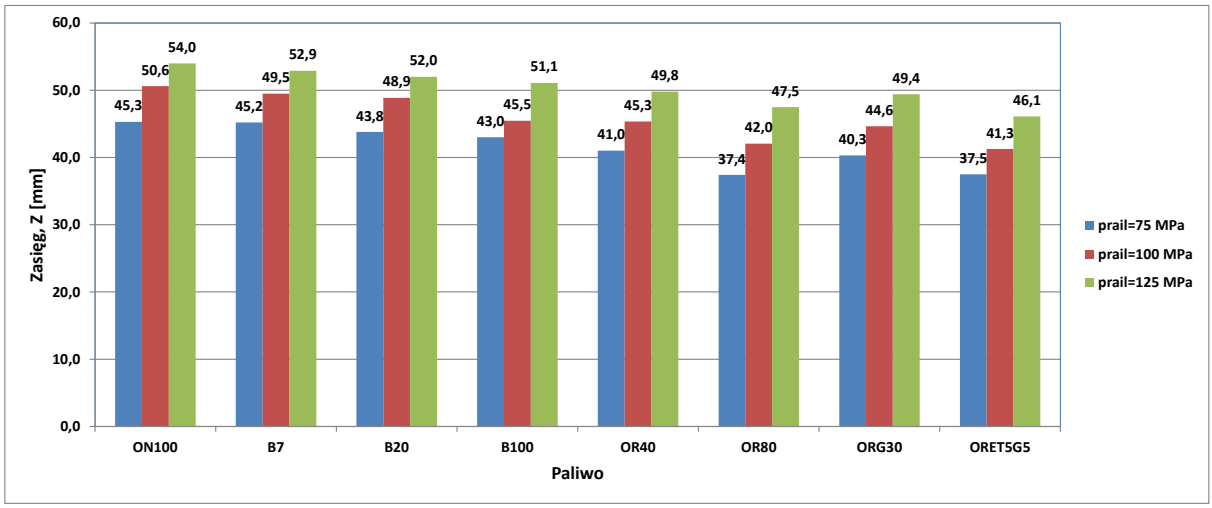


Rys. 8. Porównanie maksymalnych zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza W189 (t_{wtr} = 3ms)



Rys. 9. Porównanie maksymalnych zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza W083 (t_{wtr} = 3ms)

Dla wtryskiwacza W083 (rys. 9) uzyskano najmniejszy wpływ rodzaju paliwa na zasięg strugi. Najkrótszy zasięg strugi odnotowano również dla paliw OR80 i ORET5G5. Przy ciśnieniu w szynie p_{rail} = 125 MPa różnica zasięgu strugi paliwa ON100 i ORET5G5 wyniosła 6,9 mm, natomiast dla ciśnienia p_{rail} = 75 MPa – 6 mm. Różnice zasięgu strugi dla tego wtryskiwacza, dla wtrysku paliwa OR80 i ON100 przy ciśnieniach p_{rail} = 125 MPa oraz p_{rail} = 75 MPa wyniosły odpowiednio: 6,9 mm oraz 6,5 mm.



Rys. 10. Porównanie maksymalnych zasięgów strugi badanych paliw dla wtryskiwacza WPom (t_{wtr} = 3ms)

Dla wtryskiwacza WPom (rys. 10) uzyskano wyniki zasięgu strugi zbliżone do wtryskiwacza W083. Przy ciśnieniu w szynie p_{rail} = 125 MPa różnica zasięgu strugi paliwa ON100 i ORET5G5 wyniosła 7,9 mm, natomiast dla ciśnienia p_{rail} = 75 MPa – 7,8 mm. Różnice zasięgu strugi dla tego wtryskiwacza, dla wtrysku paliwa ON100 i OR80 przy ciśnieniach p_{rail} = 125 MPa oraz p_{rail} = 75 MPa wyniosły odpowiednio: 6,5 mm oraz 7,9 mm.

4. Wnioski

Przedstawiona metodyka badań umożliwia w stosunkowo prosty i bezpieczny sposób wyznaczenie zasięgu strugi wtryskiwanych paliw do komory wypełnionej badanym paliwem. W odniesieniu do czystego oleju napędowego bez biokomponentów ON100, paliwa zawierające biokomponenty charakteryzowały się krótszym zasięgiem strugi.

Paliwa B7 i B20 charakteryzowały się zbliżonym maksymalnym średnim zasięgiem strugi w relacji do ON bez biokomponentów. Lepkość kinematyczna oraz gęstość tych paliw w relacji do ON100 nie różniły się znacząco.

Najkrótszy zasięg zanotowano dla paliw ORET5G5 oraz OR80, charakteryzujących się znacznie większą lepkością w relacji do oleju napędowego. Lepkość kinematyczna paliwa OR80 jest ok. siedmiokrotnie większa, natomiast w przypadku paliwa ORET5G5 ok. ośmiokrotnie.

Wpływ właściwości paliwa na zasięg strugi wtryskiwanego paliwa jest także zależny od parametrów konstrukcyjnych wtryskiwacza, na co wskazują różnice zasięgu strugi zarejestrowane dla poszczególnych wtryskiwaczy. Największą różnicę w zasięgu czoła strugi odnotowano dla wtryskiwacza W044, natomiast najmniejszą dla wtryskiwacza W083.

Różnice zasięgu strugi paliw zastępczych i oleju napędowego bez biokomponentów maleją ze wzrostem ciśnienia wtrysku.

Należy zwrócić uwagę, że zmniejszanie zasięgu czoła strugi dla paliw o większej lepkości, choć pozwoliło na stwierdzenie różnic w tym zakresie dla poszczególnych paliw, to jednak wynikało w dużej mierze z faktu, iż paliwo było wtryskiwane do ośrodka ciekłego, o tych samych parametrach co paliwo wtryskiwane. W kolejnych etapach prac planowane jest rozszerzenie programu badawczego, którego celem będzie znalezienie korelacji pomiędzy parametrami makrostruktury strugi osiąganymi przy wtrysku do ośrodka gazowego i ciekłego.

Bibliography/*Literatura*

[1] Balawender K., Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: The effect of multi-phasing injection on selected parameters of common rail fuel system. Combustion Engines, No. 4/2008.

[2] Bocheński C.I.: Wpływ ciśnienia wtrysku i lepkości oleju napędowego na proces rozpylenia paliwa w silnikach z ZS. Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa MOTROL 6/2004, Lublin 2004.

[3] Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: Badania procesu wtrysku w układzie common rail w aspekcie energetycznych parametrów paliw. Combustion Engines, No 3/SC203/2011.

[4] Lejda K., Balawender K., Jaworski A., Kuszewski H., Ustrzycki A., Woś P.: Analiza determinantów dokładności procesu wtrysku paliwa w wysokociśnieniowych systemach zasilania spalinowych napędów środków transport. Sprawozdanie z realizacji projektu ba-

dawczego własnego nr N N509 256637, Rzeszów 2012 (praca nie publikowana).
[5] Lejda K., Ustrzycki A.: Effect of supply voltage on the dosage of fuel in injection system the Common Rail type. Journal of Polish CIMAC, Vol. 4, No. 2, 2009.
[6] Ustrzycki A., Kuszewski H.: Comparative study of fuel injection at common rail system using different types of fuel. Journal of Kones Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 3/2011.
[7] Wisłocki K.: Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
[8] Wisłocki K., Pielecha I., Czajka J., Maslennikov D.: The qualitative spray analysis of liquid fuel in high-pressure piezoelectric injection system. Combustion Engines No. 4/2010.

Mr Artur Jaworski, PhD – Assistant Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Artur Jaworski – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr Hubert Kuszewski, PhD – Assistant Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Hubert Kuszewski – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Prof. Kazimierz Lejda, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Kazimierz Lejda – profesor na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr Adam Ustrzycki, PhD – Assistant Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Adam Ustrzycki – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.

Mr Paweł Woś, PhD – Assistant Professor in the Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics at Rzeszów University of Technology.

Dr inż. Paweł Woś – adiunkt na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej.