

# WPLYW ZASTOSOWANIA WYBRANYCH PALIW ZASTĘPCZYCH NA DAWKOWANIE PALIWA W ZASOBNIKOWYM UKŁADZIE WTRYSKOWYM SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

Dr inż. Adam USTRZYCKI, Dr inż. Artur JAWORSKI, Dr inż. Hubert KUSZEWSKI,  
Prof. Dr hab. inż. Kazimierz Lejda, Dr inż. Paweł WOŚ

W artykule przedstawiono wyniki badań stanowiskowych procesu wtrysku paliwa w zasobnikowym układzie wtryskowym. Pomiary realizowano dla różnych paliw przeznaczonych do silników o zapłonie samoczynnym, w tym dla oleju napędowego, a także stanowiących mieszaniny oleju napędowego z estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego (EMKOR). Badania prowadzono z wykorzystaniem dwóch wtryskiwaczy elektromagnetycznych na specjalnie opracowanym stanowisku badawczym.

## 1. WSTĘP

W związku z problemami dotyczącymi efektu cieplarnianego powodowanego przez nadmierną produkcję dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>), którego znaczna część generowana jest przez pojazdy samochodowe, próbuje się wykorzystywać do zasilania silników spalinowych paliwa pochodzenia roślinnego. Ponieważ rośliny wykorzystują zawarty w powietrzu dwutlenek węgla, to w globalnym rozrachunku, paliwa pochodzenia roślinnego przyczyniają się w znacznie mniejszym stopniu do wzrostu stężenia dwutlenku węgla w atmosferze niż paliwa kopalne.

Do zasilania silników o zapłonie samoczynnym stosuje się paliwa zastępcze pochodzenia roślinnego (np. paliwo o handlowej nazwie B100) lub mieszaniny oleju napędowego i biokomponentów, zazwyczaj estrów kwasów tłuszczowych pochodzących z oleju rzepakowego [1,4]. Paliwa takie, pomimo zbliżonych parametrów, mogą różnić się od parametrów oleju napędowego lepkością, gęstością, wartością opałową oraz innymi parametrami np. smarnością [5,7], co może powodować zmiany w pracy układu wtryskowego, wpływając na dokładność i jakość dawkowania paliwa, a tym samym na pracę całego silnika [6,8].

Stosowane dziś powszechnie w silnikach, zarówno do napędu samochodów użytkowych jak i osobowych, zasobnikowe układy wtryskowe cechują się wysoką precyzją, a zastosowane w nich rozwiązania sterowania dawką, oparte na precyzyjnych przepływach hydraulicznych przez niewielkie, kalibrowane otwory we wtryskiwaczu oraz otwory rozpylacza, są szczególnie wrażliwe na zmiany takich parametrów paliwa jak lepkość.

Lepkość olejów napędowych, może wahać się w dość szerokich granicach, gdyż ich produkcja uwzględnia sezonowość stosowania. W związku z powyższym lepkość olejów letnich i przejściowych może wynosić 2 – 4,5 mm<sup>2</sup>/s, natomiast zimowych zawiera się w granicach 1,8 – 4,0 mm<sup>2</sup>/s. Należy podkreślić, że w zależności od rodzaju oleju napędowego zauważa się duży rozrzut wartości lepkości [3].

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań wielkości dawki w układzie wtryskowym typu Common Rail z dwoma różnymi wtryskiwaczami sterowanymi elektromagnetycznie. W badaniach wykorzystano olej napędowy bez dodatku biokomponentów (ON100), paliwo oparte w całości na estrach oleju rzepakowego (B100) oraz mieszanin tych paliw.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE I METODYKA BADAŃ

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu zastosowanego paliwa na wielkość dawki wtryskiwanej przez elektromagnetyczne wtryskiwacze stosowane w układach Common Rail. Poza dawką paliwa mierzono także wielkość przelewu z wtryskiwacza. Badania przeprowadzono dla dwóch różnych wtryskiwaczy sterowanych elektromagnetycznie:

- pięcioletworkowego – z silnika Fiat 1.3 MultiJet o oznaczeniu 0 445 110 083 (W083),
- sześciioletworkowego – z silnika Mercedes 2.3 CDI o oznaczeniu 0 445 110 189 (W189).

Badania wykonano w różnych warunkach pracy układu tj. dla czasów wtrysku 1 i 3 ms, ciśnień w układzie wynoszących 75, 100 i 125 MPa oraz prędkości obrotowej wynoszącej 1000

obr/min. Badania prowadzono przy realizacji wtrysku jednofazowego oraz przy zastosowaniu paliw, które przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Paliwa wykorzystane podczas badań dawkowania

Oznaczenie paliwa	Udział [% obj.]	
	Olej napędowy bez biokomponentów	Estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego – EMKOR
	<b>ON100</b>	<b>B100</b>
<b>ON100</b>	100	-
<b>B7</b>	93	7
<b>B20</b>	80	20
<b>B100</b>	-	100

Użyty w badaniach olej napędowy nie zawierał żadnych biokomponentów i był pozyskany bezpośrednio z rafinerii, gdyż taki olej nie jest dostępny w sprzedaży detalicznej na stacjach paliwowych. Natomiast paliwo oznaczone symbolem B100, czyli estry oleju rzepakowego, zakupiono na stacji paliwowej. Pozostałe paliwa B7 i B20 były mieszaninami tych dwóch paliw w odpowiednim stosunku objętościowym. Podstawowe parametry badanych paliw przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe parametry paliw wykorzystanych podczas badań dawkowania

Oznaczenie paliwa	Gęstość <sup>1</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	Lepkość kinematyczna <sup>2</sup> [mm <sup>2</sup> /s]	Wartość opałowa [kJ/kg]
<b>ON100</b>	826	2,613	43043
<b>B7</b>	830	2,713	42680
<b>B20</b>	836	2,917	41956
<b>B100</b>	878	4,329	37247

<sup>1</sup> Gęstość mierzono w temperaturze 22 °C, <sup>2</sup> Lepkość mierzono w temperaturze 40 °C

Do wyznaczenia lepkości wykorzystano automatyczny wiskozymetr niskotemperaturowy HVU 482 firmy Herzog, natomiast do pomiaru gęstości użyto gęstościomierza elektronicznego DMA 5000 M austriackiej firmy Anton Paar. Wartość opałową określono na podstawie ciepła spalania zmierzonego za pomocą kalorymetru C200 firmy IKA Werke. Wszystkie pomiary dotyczące parametrów paliw wykonano w Laboratorium Materiałów Eksploatacyjnych znajdującym się w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej.

Ze względu na to, że na typowym stanowisku probierczym zastosowanie oleju napędowego lub paliw zastępczych jest niedopuszczalne, dlatego w celu określenia wielkości dawki opracowano specjalne stanowisko pomiarowe przystosowane do zasilania różnymi paliwami. Stanowisko opracowano w oparciu o stół probierczy EPS 815, który służył do napędu pompy wysokiego ciśnienia. Układ hydrauliczny stanowiska składa się z części niskociśnieniowej umieszczonej poza stołem probierczym oraz części wysokociśnieniowej chronionej osłonami stołu probierczego w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa podczas pracy układu wtryskowego. W skład części niskociśnieniowej wchodzi [2]:

- zbiornik paliwa,
- pompa zasilająca z filtrem wstępnym,
- filtr paliwa,
- zawory do regulacji ciśnienia w pompie wysokiego ciśnienia,
- chłodnice chłodzące paliwo powracające z części wysokociśnieniowej układu,
- przepływomierze z czujnikami Coriolisa do pomiaru dawki wtryskiwacza i jego przelewu.

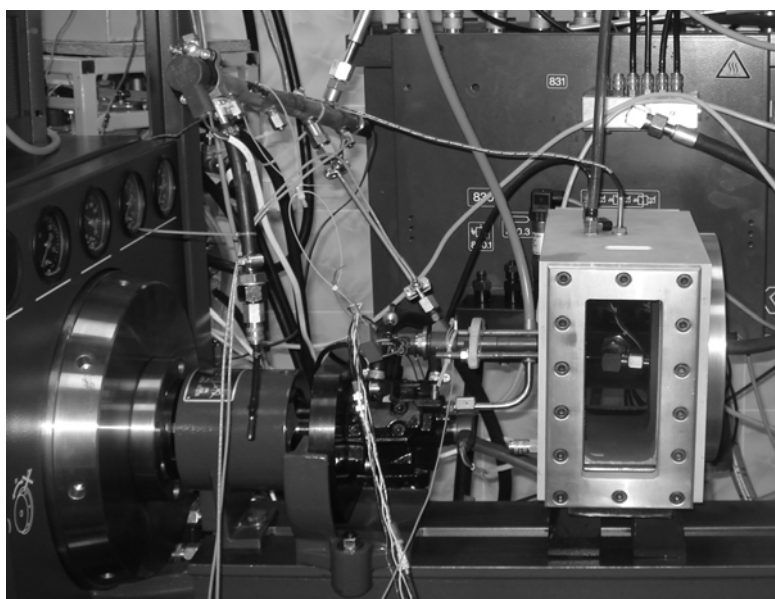
W skład części wysokociśnieniowej umieszczonej na stole probierczym wchodzi:

- pompa wysokiego ciśnienia z regulatorem ciśnienia o oznaczeniu 0445010046,
- zasobnik paliwa o oznaczeniu 0445214004 z czujnikiem ciśnienia i regulatorem ciśnienia,
- przewody wysokiego ciśnienia.
- badany wtryskiwacz wtryskujący paliwo do komory badawczej.

Całość stanowiska dopełnia sterownik współpracujący z komputerem wyposażonym w oprogramowanie umożliwiające zmiany parametrów sterownika oraz odczyt parametrów pracy układu w szczególności:

- dawki paliwa i przelewu z przepływomierzy,
- ciśnienia w szynie,
- temperatury paliwa:
  - w zbiorniku paliwa,
  - w komorze badawczej,
  - powracającego z wtryskiwacza (przelewu),
  - w przepływomierzach,
- gęstości paliwa.

Wszystkie te parametry, odczytywane co 1 sekundę, zapisywano do pliku pomiarowego. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1, a dokładny opis stanowiska przedstawiono m.in. w pracy [2].



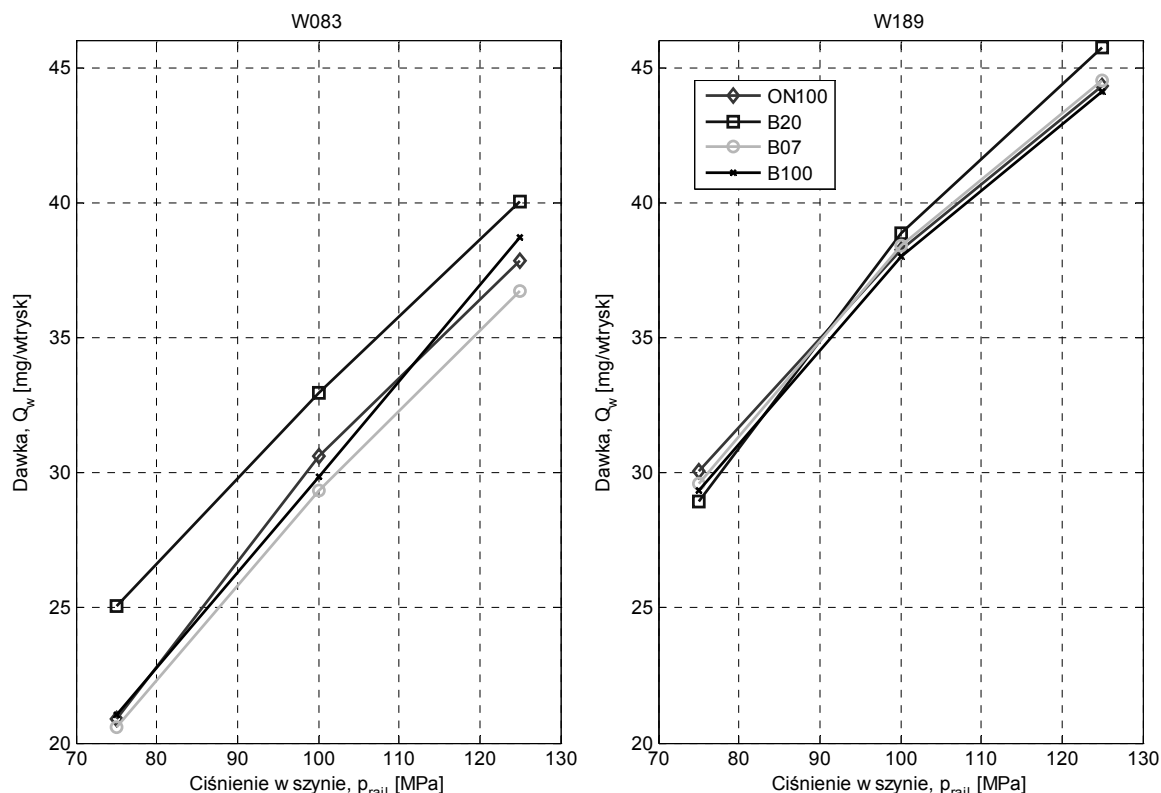
Rys. 1. Widok stanowiska badawczego – część wysokociśnieniowa (fot. własna)

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania dawkowania dla oleju napędowego ON100. Badania rozpoczynano od nagrzania stanowiska i paliwa w zbiorniku, którego temperatura była utrzymywana przez system sterujący na poziomie  $40 \pm 2^\circ\text{C}$ . Następnie prowadzono badania paliwa o oznaczeniu B20 i B7, a w ostatnim etapie paliwa B100. Po przeprowadzeniu badań na jednym paliwie cały układ dokładnie przedmuchiowano sprężonym powietrzem po uprzednim rozłączeniu poszczególnych elementów. Dla każdego paliwa prowadzono badania dawkowania dla dwóch wtryskiwaczy różniących się liczbą otworków i wielkością dawki.

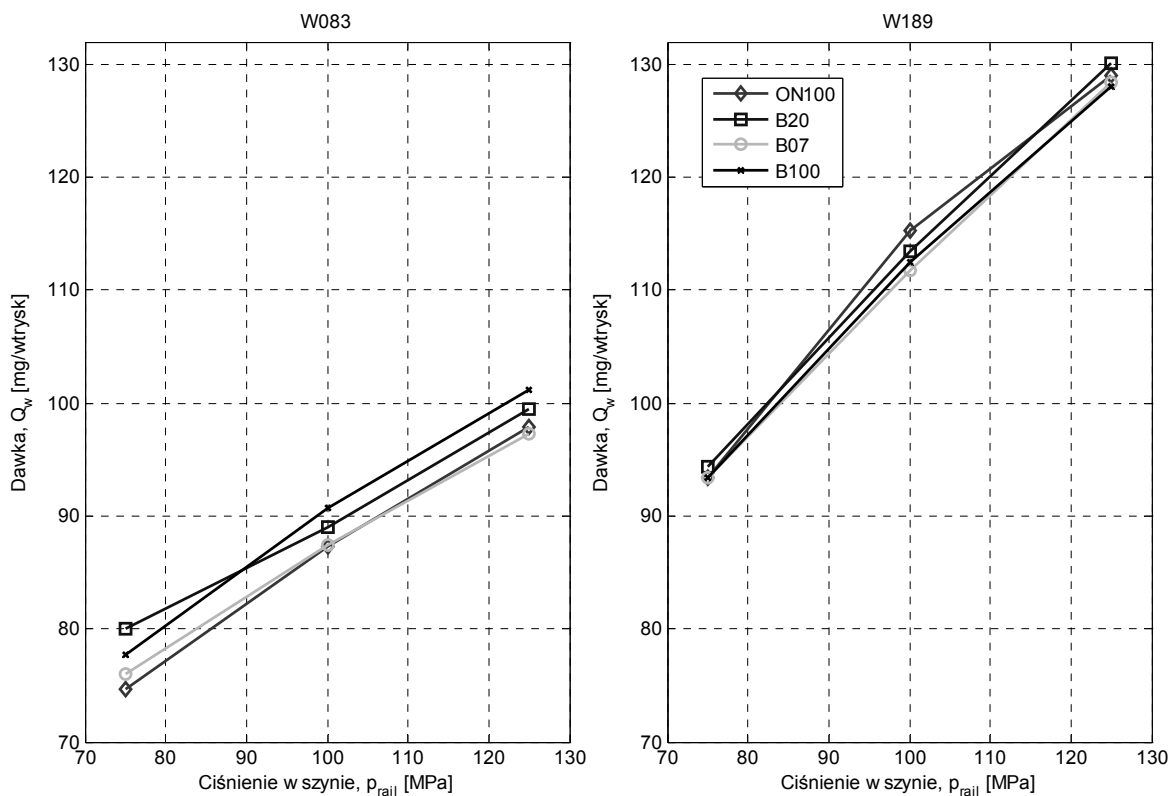
### 3. WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano szereg plików pomiarowych, do obróbki których, ze względu na dużą ilość danych, wykorzystano pakiet obliczeniowy Matlab. Na rys. 2 i 3 przedstawiono wyniki pomiaru dawki wtryskiwanego paliwa uzyskane dla czasów wtrysku  $t_{\text{wtr}} = 1$  i 3 ms. Jak widać, przebieg zmian dawki w funkcji ciśnienia w zasobniku jest zbliżony dla wszystkich analizowanych paliw, jednakże wartości dawki ulegają istotnym zmianom szczególnie dla czasu wtrysku wynoszącego 1 ms. Największa zmiana w dawkowaniu obserwowana jest dla wtryskiwacza W083 pracującego na paliwie B20 i wynosi ponad 20 % (tabela 3), co uwarunkowane jest także niewielką dawką. Maksymalne różnice występują w tym przypadku dla najniższego analizowanego ciśnienia w układzie wtryskowym wynoszącego 75 MPa. Dla dłuższego czasu wtrysku wynoszącego 3 ms zmiany w dawkowaniu dla wtryskiwacza W083 i paliwa B20 również

są największe przy tym ciśnieniu, ale wynoszą tylko ok. 7 %. Wtryskiwacz W189 wykazuje natomiast małą wrażliwość na zastosowane paliwo, przy czym największe zmiany w dawkowaniu występują także dla paliwa B20 dla małej dawki (przy ciśnieniu 75 MPa i czasie wtrysku 1 ms) i wynoszą 3,76 %.



Rys. 2. Dawka  $Q_w$  wtryskiwanego przez badane wtryskiwacze paliwa o różnych parametrach w zależności od ciśnienia w zasobniku  $p_{rail}$  dla czasu wtrysku  $t_{wtr}=1$  ms (prędkość obrotowa pompy  $n=1000$  obr/min)



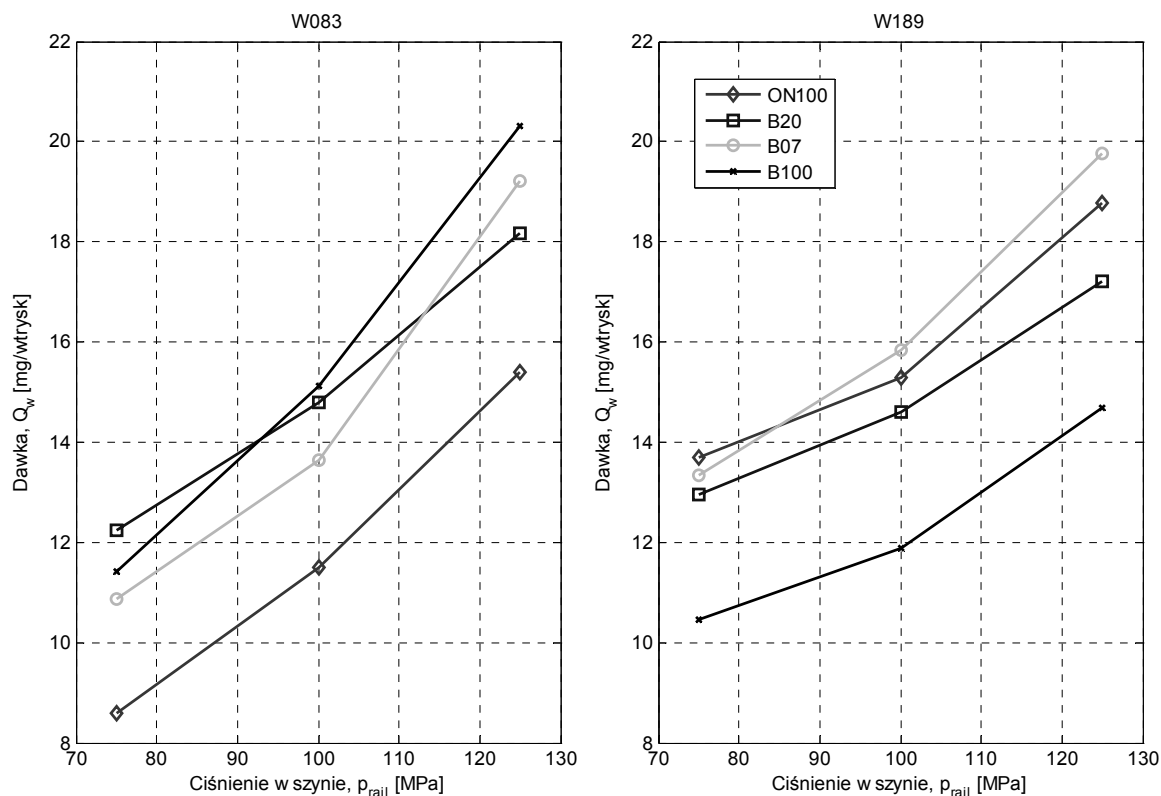
Rys. 3. Dawka  $Q_w$  wtryskiwanego przez badane wtryskiwacze paliwa o różnych parametrach w zależności od ciśnienia w zasobniku  $p_{rail}$  dla czasu wtrysku  $t_{wtr}=3$  ms (prędkość obrotowa pompy  $n=1000$  obr/min)

Różnice w dawkowaniu paliwa B7 i B20 w odniesieniu do oleju napędowego są zbliżone niezależnie od rodzaju wtryskiwacza, należy jednak podkreślić, że wtryskiwacz W083 wykazuje nieco mniejsze zmiany w dawkowaniu podczas pracy na paliwie B7.

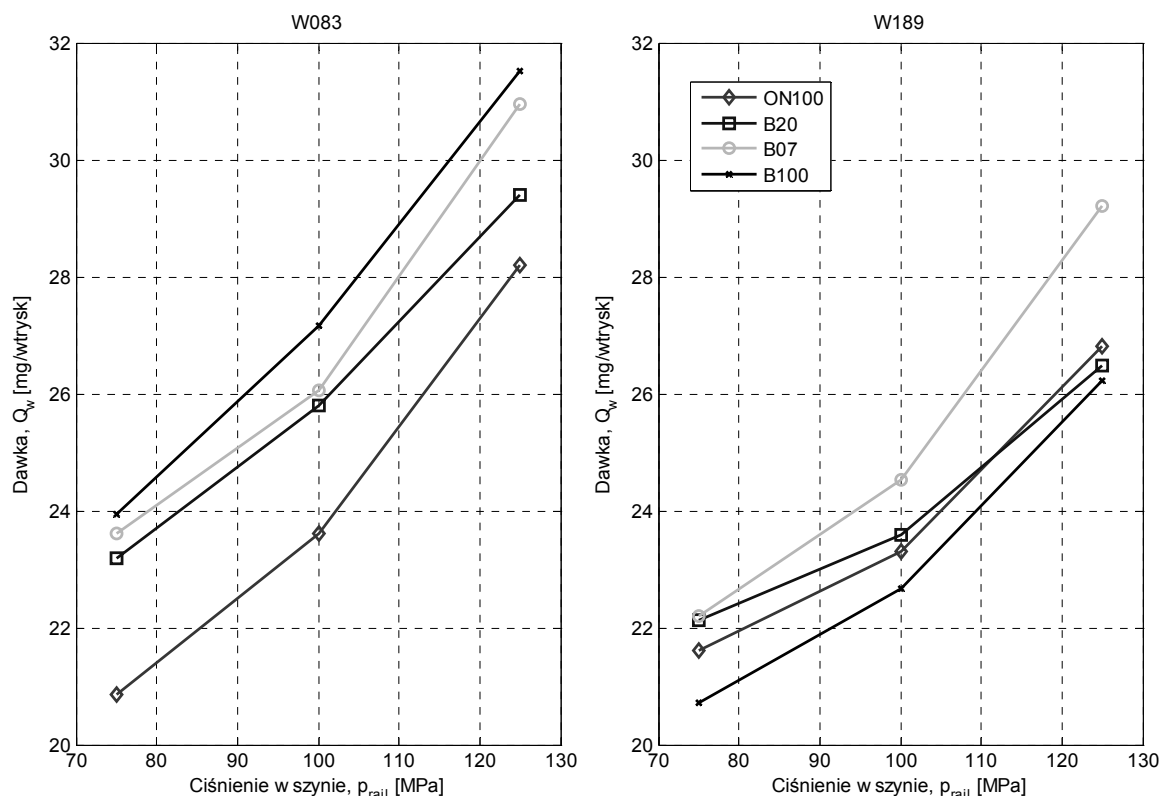
Tabela 3. Odchylenie dawki wtryskiwanego paliwa oraz przelewu dla poszczególnych paliw w odniesieniu do paliwa ON100

LP.	Wtryskiwacz	Ciśnienie w szynie [MPa]	Czas wtrysku [us]	B7		B20		B100	
				$\delta Q_w$	$\delta Q_p$	$\delta Q_w$	$\delta Q_p$	$\delta Q_w$	$\delta Q_p$
				[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	W083	75	1000	1,48%	26,28%	20,05%	42,21%	0,72%	32,91%
2	W083	100	1000	4,31%	18,59%	7,60%	28,58%	2,48%	31,36%
3	W083	125	1000	2,96%	24,66%	5,78%	17,85%	2,24%	31,73%
4	W083	75	3000	1,82%	13,14%	7,13%	11,17%	4,13%	14,77%
5	W083	100	3000	0,14%	10,33%	1,88%	9,27%	3,86%	14,99%
6	W083	125	3000	0,54%	9,71%	1,67%	4,25%	3,42%	11,70%
7	W189	75	1000	1,56%	2,48%	3,76%	5,41%	2,36%	23,52%
8	W189	100	1000	0,39%	3,46%	1,54%	4,64%	0,68%	22,35%
9	W189	125	1000	0,50%	5,17%	3,32%	8,36%	0,41%	21,83%
10	W189	75	3000	0,03%	2,78%	1,08%	2,41%	0,04%	4,16%
11	W189	100	3000	3,15%	5,24%	1,62%	1,24%	2,48%	2,66%
12	W189	125	3000	0,50%	8,99%	0,87%	1,19%	0,74%	2,20%

Analizując wielkość przelewu z wtryskiwacza (rys. 4 i 5) można zauważyć, że najmniejsze wartości tego parametru występują w przypadku wtryskiwacza W083 dla oleju napędowego. Dla pozostałych paliw, wartości przelewu z tego wtryskiwacza są większe, niezależnie od czasu wtrysku w całym zakresie badanych ciśnień.



Rys. 4. Przelewu  $Q_p$  z badanych wtryskiwaczy pracujących przy zastosowaniu paliw o różnych parametrach w zależności od ciśnienia w zasobniku  $p_{rail}$  dla czasu wtrysku  $t_{wtr}=1$  ms (prędkość obrotowa pompy  $n=1000$  obr/min)



Rys. 5. Przelew  $Q_p$  z badanych wtryskiwaczy pracujących przy zastosowaniu paliw o różnych parametrach w zależności od ciśnienia w zasobniku  $p_{rail}$  dla czasu wtrysku  $t_{wtr}=3$  ms (prędkość obrotowa pompy  $n=1000$  obr/min)

Z kolei dla wtryskiwacza W189 najmniejsze wartości przelewu występują dla paliwa B100 dla wszystkich analizowanych czasów wtrysku i ciśnień w układzie.

Maksymalne zmiany przelewu występują, podobnie jak w przypadku dawki wtryskiwanego paliwa, dla wtryskiwacza W083 pracującego na paliwie B20 w takich samych warunkach pracy (tabela 3). W tym przypadku zmiany strumienia paliwa przekraczają 40%, co skutkuje również istotnymi zmianami dawki. Największe zmiany przelewu paliwa z wtryskiwacza, poza omówionym przypadkiem, występują dla paliwa B100 dla obu wtryskiwaczy, jednakże nie powoduje to dużych zmian w dawkowaniu.

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Z przedstawionych badań wynika, że przy zastosowaniu paliw zastępczych, których lepkość nie odbiega znacząco od lepkości oleju napędowego, mogą występować istotne różnice w dawkowaniu paliwa, uzależnione od warunków pracy i rodzaju wtryskiwacza. Maksymalne zmiany, jakie zaobserwowano podczas badań, wynosiły ponad 20 % w czasie pracy wtryskiwacza zasilanego paliwem B20, będącym mieszaniną czystego oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego (B100). Pomimo, że różnica w lepkości paliwa B100 w odniesieniu do oleju napędowego była znacznie większa niż paliwa B20, to zmiany w dawkowaniu były mniejsze. Wynikać to może ze znacznie większej gęstości paliwa B100, co może kompensować mniejsze, ze względu na większą lepkość, wartości odmierzanych objętościowo przez wtryskiwacz dawek paliwa. Należy podkreślić, że przeprowadzona w artykule analiza zmian w dawkowaniu dotyczyła wartości masowych, gdyż pozwala to na prawidłowe określenie ilości energii doprowadzanej z paliwem do cylindrów silnika. Mając to na względzie, należy zauważyć, że w związku z mniejszą o ponad 13 % wartością opałową paliwa B100, utrzymywanie się dawkowania na stałym poziomie (maksymalna różnica wynosiła ok. 4 %), spowoduje obniżenie wartości energetycznej dawki, co będzie skutkowało pogorszeniem parametrów silnika spalinowego.

Zmiana wielkości dawki paliwa może też być powodowana innymi parametrami analizowanych paliw, takimi jak skład frakcyjny, smarność, czy zawartość wody w paliwie, co będzie przedmiotem dalszych badań.

## LITERATURA

- [1] Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKiŁ, Warszawa 2004.
- [2] Balawender K., Lejda K., Ustrzycki A.: Stanowisko badawcze wtryskowych układów Common rail zasilanych paliwami różnego typu. No 22 `2011, Вісник Національного транспортного університету, Київ 2011.
- [3] 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.
- [4] Bocheński C.I., Bocheńska A.: Olej rzepakowy paliwem do silników Diesla. Czasopismo Techniczne, z.8-M, Kraków 2008.
- [5] Kuszewski H, Jaworski A, Ustrzycki A.: Badania smerności wybranych paliw zastępczych stosowanych w transporcie samochodowym. Вісник Національного транспортного університету, No 23/2011, Київ 2011.
- [6] Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: Determinanty dokładności dawkowania paliwa w systemie zasobnikowego układu zasilania Common Rail. Czasopismo Techniczne - Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 8-M/2008, zeszyt 12 (105), Kraków 2008, (s. 161-172).
- [7] Kuszewski H., Lejda K., Ustrzycki A.: Study of the injection process in the common rail system in aspect of fuel energy parameters. Combustion Engines, No 3/SC203/2011.
- [8] 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.

## THE EFFECT OF USING SELECTED ALTERNATIVE FUELS ON FUEL DELIVERY AT COMMON RAIL SYSTEM FOR DIESEL ENGINE

The article presents results of study of fuel injection process for Common Rail system. The measurements have been realized for different fuels designed for diesel engines, including standard diesel fuel, as well as mixtures of diesel fuel with rape methyl ester (RME). The study have been conducted for two electromagnetic injectors on specially test stand.

*Praca naukowa finansowana jest ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy.*

*Program MATLAB wykorzystany do przeprowadzenia badań został zakupiony w wyniku realizacji Projektu nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00 „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.*