

STUDY OF THE INJECTION PROCESS IN THE COMMON RAIL SYSTEM IN ASPECT OF FUEL ENERGY PARAMETERS

Abstract: The paper presents preliminary results for study concerning a fuel injection using the method of injection into the constant volume chamber filled with fuel. A specially designed test stand allowing the maintenance of stable working conditions of the injection system is presented. The study was conducted under different conditions of working the Common Rail injection system. In the next stage calorific value of alternative fuels were measured to choose the opening time of injector, which independently from used fuel will provide an energy equivalent fuel charge.

Key words: Common Rail system, diesel engine, fuel injection

BADANIA PROCESU WTRYSKU W UKŁADZIE COMMON RAIL W ASPEKCIE ENERGETYCZNYCH PARAMETRÓW PALIWA

Streszczenie: W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań dotyczące wtrysku paliwa przy wykorzystaniu komory o stałej objętości, wypełnionej paliwem. Przedstawiono specjalnie do tego celu opracowane stanowisko badawcze, umożliwiające utrzymywanie stabilnych warunków pracy układu wtryskowego. Badania prowadzono w różnych warunkach pracy układu wtryskowego Common Rail. Dokonano pomiaru wartości opałowej paliw alternatywnych w celu doboru czasu otwarcia wtryskiwacza, który niezależnie od zastosowanego paliwa zapewni równoważną energetycznie dawkę paliwa.

Słowa kluczowe: akumulacyjne układy zasilania, silnik wysokoprężny, wtrysk paliwa

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój systemów zasilania typu Common Rail wynika przede wszystkim z ich dużej elastyczności w kształtowaniu przebiegu wtrysku, co jednocześnie sprawia, iż są to obecnie najczęściej stosowane rozwiązania stosowane w silnikach wysokoprężnych. Z uwagi na ciągle zaostrzanie norm odnośnie toksyczności spalin, współcześnie projektowane systemy wtryskowe muszą cechować się wyjątkową precyzją sterowania dawką. Związane jest to także z dążeniem do zachowania w każdym z cylindrów jednakowych, optymalnych warunków pracy, co jest kluczowym zagadnieniem w silnikach wielocylindrowych. W układzie Common Rail sterowanie dawką odbywa się w obrębie wtryskiwacza i to jego parametry mają największy wpływ na precyzję sterowania dawkowaniem [1,4,5,6].

Rozwój silników wysokoprężnych z bezpośrednim wtryskiem paliwa, w których stosuje się głównie zasobnikowe układy wtryskowe wynika, jak wspomniano, głównie z uwarunkowań ekologicznych. Te same względy decydują o rosnącym zainteresowaniu paliwami alternatywnymi. Zastosowanie paliw alternatywnych do zasilania silnika spalinowego za pomocą układu wtryskowego typu Common Rail, biorąc pod uwagę jego elastyczność w kształtowaniu charakterystyki wtrysku, powinno

umożliwić ograniczenie negatywnego wpływu motoryzacji na środowisko naturalne. Należy jednak zwrócić uwagę, że zastosowanie paliw alternatywnych, których właściwości różnią się od właściwości paliw tradycyjnych, wymaga odpowiedniego przystosowania układu wtryskowego. Odmienne wartości parametrów energetycznych paliw alternatywnych, jak również ich lepkości, wymagają odpowiedniego dostosowania sumarycznego czasu wtrysku w celu dostarczenia ekwiwalentnej pod względem energetycznym dawki paliwa tak, by jednocześnie zachować poziom wymaganej emisji składników toksycznych.

Szczególnie istotnym zagadnieniem jest opracowanie takiego algorytmu procesu dawkowania paliwa, który będzie uwzględniał nie tylko indywidualne cechy i parametry wtryskiwaczy, ale również odmienne właściwości paliwa. Zmiana algorytmu sterowania wtryskiwacza może mieć wpływ na parametry makrostruktury strugi rozpylanego paliwa, która zasadniczo jest optymalizowana dla typowego paliwa stosowanego do zasilania silników wysokoprężnych [7,9].

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiarów wartości opałowej różnego rodzaju paliw oraz wstępne wyniki badań czterech wtryskiwaczy różnego typu, przy zastosowaniu oleju napędowego bez dodatku biokomponentów jako paliwa bazowego.

2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Prowadzenie badań układów wtryskowych zasilanych paliwami różnego typu wymaga zastosowania specjalnego stanowiska badawczego, gdyż użycie innego oleju niż olej probierczy w typowym stole probierczym jest niedopuszczalne przez producenta stołu. W uzasadnieniu zwraca się uwagę na to, że paliwa będące mieszaninami z zastosowaniem biokomponentów mogą mieć negatywny wpływ na systemy uszczelnienia stołu probierczego oraz układ pomiarowy.

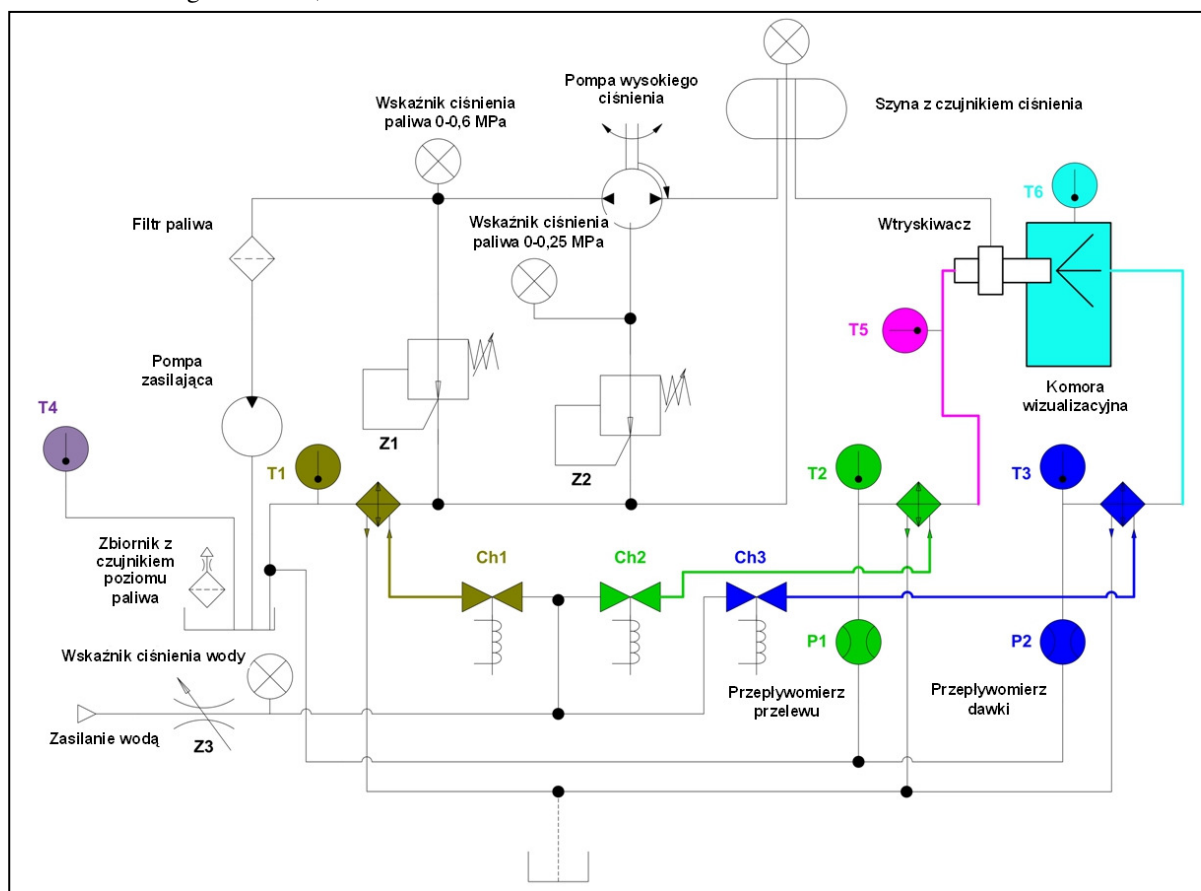
W celu umożliwienia badań procesu wtrysku w układach wtryskowych typu Common Rail, z wykorzystaniem oleju napędowego oraz biopaliw, opracowano stanowisko badawcze z odrębnym systemem obiegu paliwa, które umożliwia uzyskanie stabilnych parametrów pracy układu wtryskowego w odniesieniu do parametrów sygnału sterującego wtryskiwaczem oraz temperatury, a więc ze względu na istotny wpływ tych czynników na proces dawkowania paliwa. Stanowisko zbudowano w oparciu o stół probierczy firmy Bosch EPS-815. Składa się ono z następujących układów funkcjonalnych:

– obwodu niskiego ciśnienia,

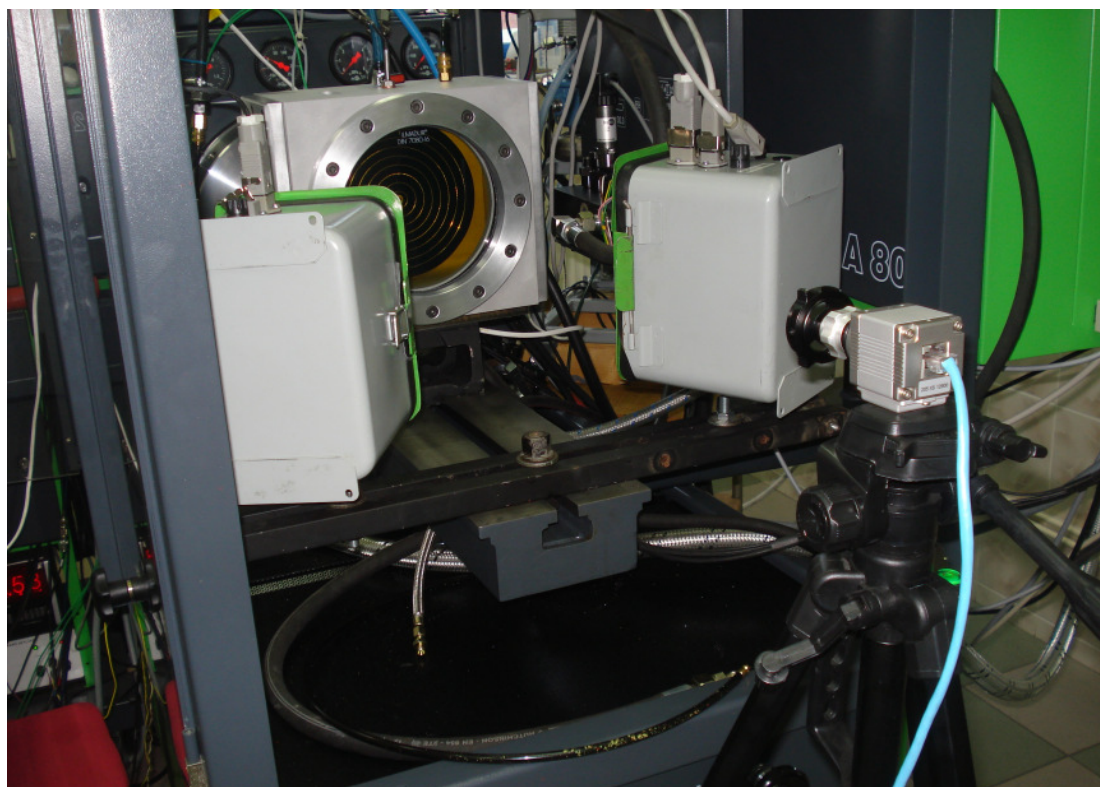
- obwodu wysokiego ciśnienia,
- sterownika,
- komputera nadzorującego.

Część niskociśnieniową układu umieszczono w metalowej, mobilnej konstrukcji wraz z elementami systemu chłodzenia paliwa oraz przepływomierzami. Paliwo ze zbiornika podawane jest przez elektryczną pompę paliwa z czujnikiem poziomu paliwa i poprzez filtr dostaje się do pompy wysokiego ciśnienia. Ciśnienie na wlocie i przelewie pompy wysokociśnieniowej jest regulowane zaworami i kontrolowane za pomocą manometrów o odpowiednich zakresach pomiarowych. Paliwo z zaworów powraca do zbiornika poprzez chłodnicę, przez którą przepływ cieczy chłodzącej jest regulowany za pomocą zaworu elektromagnetycznego, na podstawie informacji o temperaturze powracającego paliwa.

Część wysokociśnieniową, w skład której wchodzi pompa wysokiego ciśnienia, szyna paliwowa (zasobnik), wtryskiwacz zamontowany w komorze wizualizacyjnej oraz przewody wysokiego ciśnienia, umieszczona jest na stanowisku probierczym, które wykorzystywane jest do napędu pompy wysokiego ciśnienia. Schemat hydrauliczny stanowiska przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Schemat hydrauliczny stanowiska do badania układów wtryskowych typu Common Rail zasilanych różnymi paliwami [2]: T1-T6 – termopary, Z1, Z2 – ręczne zawory sterujące ciśnieniem zasilającym i przelewem pompy wysokociśnieniowej, Z3 – zawór redukcyjny ciśnienia wody, Ch1, Ch2, Ch3 – elektrozawory sterujące przepływem cieczy chłodzącej



Rys. 2. Widok komory wizualizacyjnej z systemem oświetlenia stroboskopowego zamontowanych na stanowisku badawczym (fot. własna)

Stanowisko nadzorowane jest za pomocą opracowanego kontrolera, który steruje:

- układem wtryskowym (wtryskiwaczem oraz modulatorami pompy i zasobnika poprzez moduły mocy),
- elektrozaworami poszczególnych chłodziw paliwa (poprzez moduły mocy i przekładniki),
- odczytem temperatur z określonych punktów stanowiska (z których część stanowi informację dla układu sterowania chłodziwami paliwa).

Stanowisko wyposażono w specjalnie zaprojektowaną komorę wizualizacyjną, z systemem oświetlenia stroboskopowego, do rejestracji rozwoju strugi wtryskiwanego paliwa (rys.2). Proces rozwoju strugi filmowano za pomocą systemu wizualizacyjnego typu AVL Visioscope. Do rejestracji przebiegów szybkozmiennych, takich jak ciśnienia w układzie wtryskowym oraz sygnały elektryczne, zastosowano system akwizycji danych oparty na karcie pomiarowej firmy National Instruments o maksymalnej częstotliwości próbkowania wynoszącej 1 MHz. Szerszy opis stanowiska przedstawiono w pracy [2]

W pierwszym etapie badań, których wyniki przedstawiono w tym artykule, wykonano pomiary parametrów procesu wtrysku dla układu zasilanego olejem napędowym bez dodatku biokomponentów, jako oleju bazowego. Badania przeprowadzono dla czterech różnych wtryskiwaczy sterowanych elektromagnetycznie:

- pięciootworkowego – z silnika Fiat 1.3 MultiJet o oznaczeniu 0 445 110 083 (W083),
- pięciootworkowego – z silnika Peugeot 2.0 HDI o oznaczeniu 0 445 110 044 (W044),
- sześciotworkowego – z silnika Mercedes 2.3 CDI o oznaczeniu 0 445 110 089 (W189),
- pięciootworkowego – o oznaczeniu 0 445 110 083 z czujnikiem wzniosu iglicy (Wpom).

Badania wykonano w różnych warunkach pracy układu tj. dla czasów wtrysku 1 i 3 ms, ciśnien w układzie wynoszących 75, 100 i 125 MPa oraz prędkości obrotowej wynoszącej 1000 obr/min. Badania prowadzono przy realizacji wtrysku jednofazowego.

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano serie zdjęć, z których odczytano początki wtrysku oraz zasięg strugi. Za początek wtrysku uznawano kąt odczytany ze zdjęcia, dla którego na fotografii można było zaobserwować strugę paliwa wypływającą z któregośkolwiek otworka rozpylacza. Zasięg strugi określano w [mm] po uzyskaniu 5° obrotu wałka pompy licząc od rzeczywistego początku wtrysku. W tym punkcie określano zasięg dla każdej strugi oddzielnie i obliczano wartość średnią zasięgu dla każdego wtryskiwacza (rys. 4).

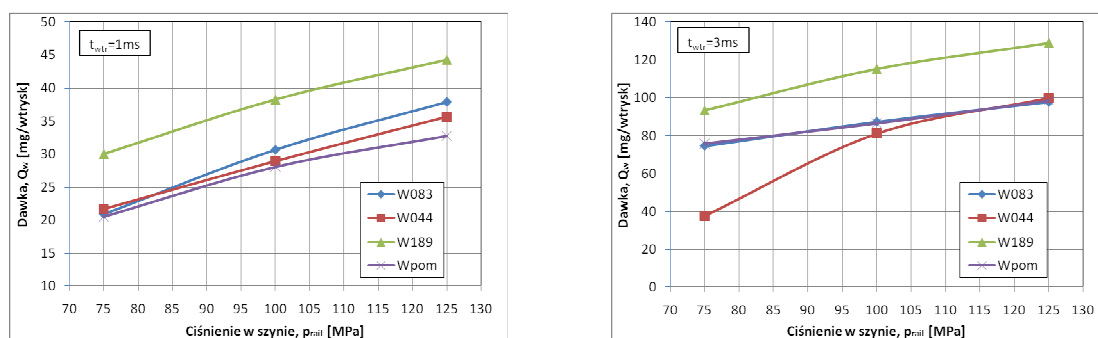
W drugim etapie badań, o czym sygnalizuje ten artykuł, określono wartości opałowe paliw, na podstawie których obliczone zostały równoważne energetycznie dawki i odpowiadające im wartości czasu wtrysku.

3. Wyniki badań

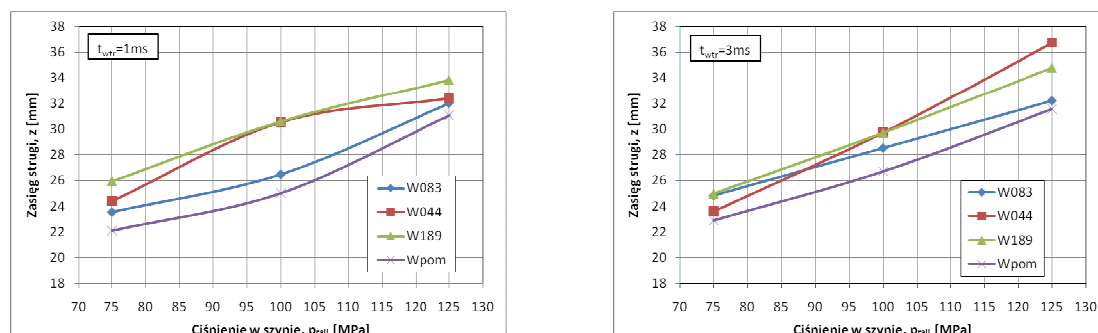
Wyniki badań przedstawione na rys. 3 dowodzą, że wtryskiwacze pięciootworkowe charakteryzują się zbliżonymi wielkościami dawki w przypadku krótkiego czasu wtrysku (1 ms). Wzrost ciśnienia powoduje prawie liniowy wzrost dawki. W przypadku dłuższego czasu (3 ms) charakterystyka wtryskiwacza W044 staje się nieliniowa, a zmiany dawki w funkcji ciśnienia są dla tego wtryskiwacza największe. W tym warunkach pracy, dla tego wtryskiwacza występują także największe zmiany zasięgu strugi wraz ze wzrostem ciśnienia. Wszystkie badane wtryskiwacze charakteryzują się dużymi

różnicami zasięgu poszczególnych strug w zależności od ciśnienia w szynie (rys. 5).

Kolejny etap prac ukierunkowany został na zagadnienia adaptacji algorytmu sterowania układem wtryskowym przystosowanym do zasilania paliwami o odmiennych parametrach w stosunku do parametrów oleju napędowego. W takim przypadku istotne jest m.in. uwzględnienie różnic w wartościach opałowych paliw. W szczególności, przy zasilaniu biopaliwami, z uwagi na ich niższą wartość opałową w stosunku do oleju napędowego, celem wtrysku do cylindra równoważnej energetycznie dawki paliwa niezbędna jest odpowiednia korekta czasu otwarcia wtryskiwacza.



Rys. 3. Dawka paliwa Q_w dla czterech badanych wtryskiwaczy w zależności od ciśnienia w szynie p_{rail} ($n = 1000$ obr/min) [8]



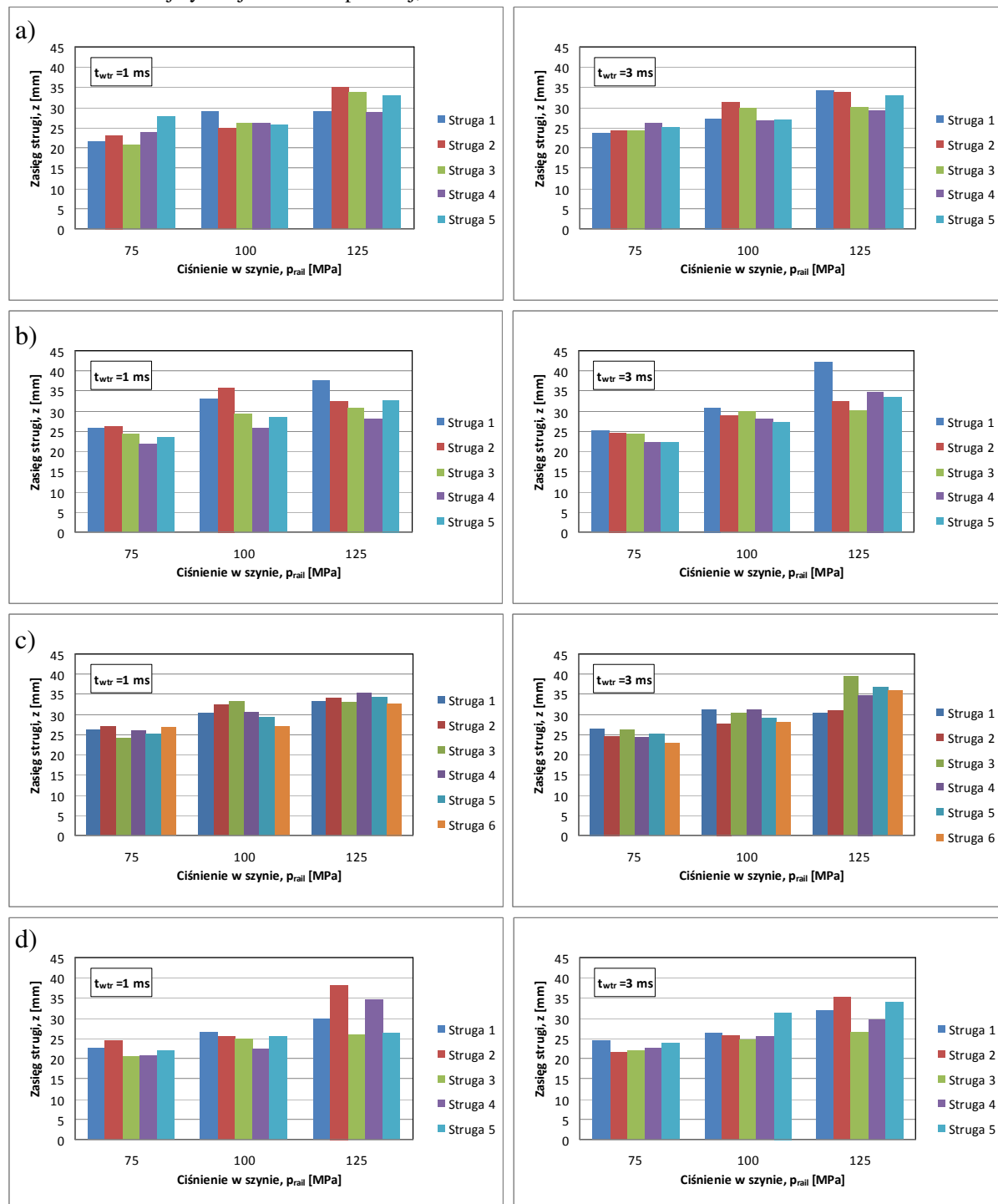
Rys. 4. Zasięg strugi paliwa z dla czterech badanych wtryskiwaczy w zależności od ciśnienia w szynie p_{rail} ($n = 1000$ obr/min) [8]

Tabela 1. Rodzaje paliw wybranych do badań [3]

Lp.	Nazwa	Udziały [% obj.]				
		ON bez biododatków (ON100)	ON (handlowy) (ONH)	Biodiesel (EMKOR – B100)	Olej rzepakowy (OR)	Benzyna (G)
1.	ON100	100	0	0	0	0
2.	ONH	0	100	0	0	0
3.	B100	0	0	100	0	0
4.	OR	0	0	0	100	0
5.	B5	95	0	5	0	0
6.	B7	93	0	7	0	0
7.	B10	90	0	10	0	0
8.	B20	80	0	20	0	0
9.	OR20	0	80	0	20	0
10.	OR40	0	60	0	40	0
11.	OR60	0	40	0	60	0
12.	OR80	0	20	0	80	0
13.	ORG20	0	0	0	80	20

Mając na uwadze powyższe, określono wartości opałowe wybranych paliw stanowiących kompozycje na bazie estrów olejów roślinnych, olejów roślinnych oraz paliw konwencjonalnych – oleju napędowego i benzyny silnikowej. Charakterystyka kompozycji paliwowych została przedstawiona w tabeli 1. W tabeli 2 przedstawiono wyniki badań wartości opałowej paliw przedstawionych w tabeli 1. Następnie, przyjmując jako paliwo bazowe paliwo ON100 – o najwyższej wartości opałowej, obli-

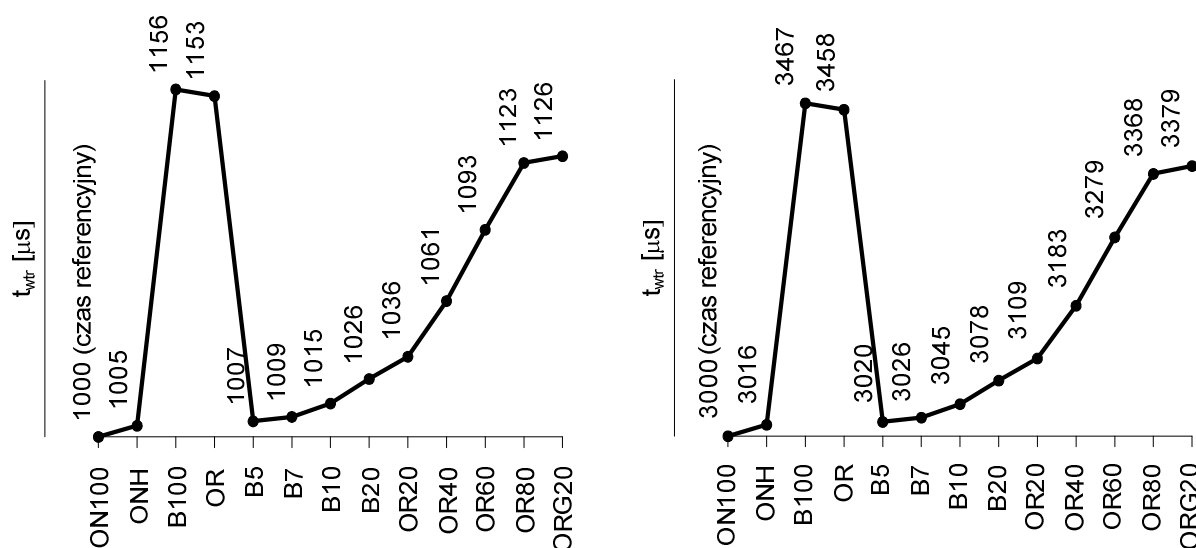
czono wymagane korekty czasu otwarcia wtryskiwacza w stosunku do czasu bazowego wynoszącego $t_{wtr} = 1000 \mu s$ oraz $t_{wtr} = 3000 \mu s$ tak, aby wartość energetyczna dawki paliwa ON100 dla przyjętych czasów t_{wtr} była taka sama jak dla pozostałych paliw. Na rys. 6 przedstawiono w sposób graficzny skorygowane czasy otwarcia wtryskiwacza dla rozpatrywanych paliw. Jak widać, zakres obliczonych czasów wtrysku zmienia się w granicach ok. 12 %.



Rys. 5. Różnice zasięgu strug paliwa z w zależności od ciśnienia w szynie p_{rail} ($n = 1000 \text{ obr/min}$): a) dla wtryskiwacza W083, b) dla wtryskiwacza W044, c) dla wtryskiwacza W189, d) dla wtryskiwacza Wpom

Tabela 2. Ciepło spalania i wartość opałowa paliw oraz skorygowane czasy otwarcia wtryskiwacza t_{wtr}

Paliwo	Ciepło spalania [kJ/kg]	Wartość opałowa [kJ/kg]	Skorygowany czas wtrysku w stosunku do ON100 – t_{wtr} [μs] dla $t_{wtr} = 1000$ μs	Skorygowany czas wtrysku w stosunku do ON100 – t_{wtr} [μs] dla $t_{wtr} = 3000$ μs
ON100	46008	43043	1000	3000
ONH	45698	42814	1005	3016
B100	39889	37247	1156	3467
OR	39727	37347	1153	3458
B5	45702	42758	1007	3020
B7	45618	42680	1009	3026
B10	45327	42401	1015	3045
B20	44852	41956	1026	3078
OR20	44299	41531	1036	3109
OR40	43232	40566	1061	3183
OR60	41940	39375	1093	3279
OR80	40816	38345	1123	3368
ORG20	40587	38213	1126	3379

Rys. 6. Zmiany czasu otwarcia wtryskiwacza t_{wtr} dla analizowanych paliw

Rzeczywisty czas wtrysku musi uwzględniać wpływ odmiennych w odniesieniu do oleju napędowego wartości parametrów fizyko-chemicznych analizowanych paliw. W kolejnym etapie badań, dotyczących procesów wtrysku, zostaną uwzględnione obliczone korekty czasów t_{wtr} z tego powodu (tabela 1) i na drodze doświadczalnej zweryfikowane wartości tego czasu uwzględniające parametry paliw, które mają istotny wpływ na wielkość dawki (np. lepkość).

4. Wnioski

Analizując wstępne wyniki dotyczące wybranych parametrów procesu wtrysku oraz zarejestrowane przebiegi rozwoju strugi można stwierdzić, że wszystkie badane wtryskiwacze charakteryzują się

widoczną niepowtarzalnością kolejnych cykli pracy, co jest szczególnie zauważalne przy poklatkowej metodzie rejestracji tych przebiegów, polegającej na filmowaniu kolejnych klatek filmu w kolejnych cyklach pracy wtryskiwacza. Niepowtarzalność ta może być wynikiem znacznych zmian ciśnienia występujących we wtryskiwaczu. Niepowtarzalność ta wpływa w istotnym stopniu na duży rozrzut zasięgu poszczególnych strug paliwa.

Przeprowadzone badania wartości opałowej paliw skomponowanych na bazie paliw konwencjonalnych, oleju roślinnego i estrów, wskazują na dość znaczne różnice wartości tego parametru w stosunku do oleju napędowego. Dokładnie określona wartość opałowa paliw pozwoli na precyzyjny dobór czasu otwarcia wtryskiwacza w celu dozowania, niezależnie od rodzaju paliwa, energetycznie

równoważnej dawki paliwa. Prowadzone są aktualnie dalsze prace w tym zakresie w Zakładzie Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Rzeszowskiej.

W następnych publikacjach zostaną przedstawione wyniki badań uzyskane na opracowanym stanowisku dla przyjętej konfiguracji skomponowanych mieszanin paliw w aspekcie zasięgu strugi i wielkości dawki oraz porównane z wynikami dla oleju napędowego, które zawarto w niniejszym artykule.

Bibliography/Literatura

- [1] Balawender K., Kuszewski H., Lejda K, Ustrzycki A.: The influence of mutual angle position of main, pilot and preinjection dose on fuel dosing in Common Rail system. Journal of POLISH CIMAC - Energetic Aspects, Vol. 3, No. 1, Gdansk 2008.
- [2] Balawender K., Lejda K, Ustrzycki A.: Stanowisko badawcze wtryskowych układów Common Rail zasilanych paliwami różnego typu. Вісник Національного транспортного університету, No 22/2011, Київ 2011.
- [3] Jaworski A, Kuszewski H, Ustrzycki A.: Wpływ biododatków na parametry energetyczne paliw stosowanych w spalinowych napędach środków transportu. Вісник Національного транспортного університету, No 22/2011, Київ 2011.
- [4] Kuszewski H., Lejda K.: Wybrane metody ograniczania toksyczności spalin silnika ZS w aspekcie limitów emisyjnych. Journal of KONES „Powertrain and Transport”, Vol. 13, No.1, Warszawa 2006.
- [5] Kuszewski H., Ustrzycki A.: Wpływ parametrów pracy zasobnikowego układu wtryskowego na rzeczywisty początek wtrysku paliwa. Silniki Spalinowe – „Mixture Formation, Ignition & Combustion”, SC2, 2007.
- [6] Kuszewski, H., Ustrzycki, A., Balawender, K., Lejda, K.: The effect of multi-phasing injection on selected parameters of high-pressure fuel system Common Rail. Silniki Spalinowe, Nr 4/2008.
- [7] Lejda K: Selected problems of fuel supply in high-speed Diesel engines. Publishers “Meta”, Lwów 2004.
- [8] Ustrzycki A., Jaworski A., Kuszewski H.: Wizualizacyjne badania porównawcze procesu wtrysku elektromagnetycznych wtryskiwaczy systemu Common Rail. Вісник Національного транспортного університету, No 22/2011, Київ 2011.
- [9] Praca zbiorowa, Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail. Informatory techniczne Bosch. WKiŁ, Warszawa 2005.

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

Mr Hubert Kuszewski, PhD – Doctor 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 – Doctor 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.

