

Jerzy Cisek*

WIZUALIZACJA WTRYSKU I SPALANIA PALIW RZEPAKOWYCH W SILNIKU WYSOKOPRĘŻNYM

Streszczenie. Celem niniejszego opracowania było określenie możliwości zastosowania systemu wizualizacji wtrysku i spalania paliwa do analizy zjawisk wewnątrz cylindra silnika zasilanego olejem napędowym, RME i naturalnym olejem rzepakowym. Na stanowisku badawczym z jednocylinrowym silnikiem badawczym analizie poddano zjawiska związane z przebiegiem wtrysku, samozapłonu i spalania badanych paliw.

Słowa kluczowe: silnik wysokoprężny, olej rzepakowy, RME, wtrysk, spalanie, wizualizacja

WSTĘP

Zainteresowanie paliwami roślinnymi dla silników wysokoprężnych, w tym zarówno naturalnymi, jak i produktami ich tranestryfikacji, spowodowało powstanie dużej ilości publikacji opisujących wyniki badań w różnych laboratoriach. Większość jednak danych dotyczy określenia wpływu zawartości oleju roślinnego lub ich estrów w mieszaninie z olejem napędowym na podstawowe parametry energetyczne i toksyczność spalin. Znacznie mniejsza ilość informacji dotyczy parametrów wykresów indykatorowych, prędkości wywiązywania się ciepła, charakterystyki wtrysku paliwa czy zmienności temperatur w cylindrze silnika, co daje podstawę do analizy przyczynowo-skutkowej. Natomiast praktycznie brak badań, które poprzez wizualizację wtrysku, samozapłonu i spalania pozwalają na bezpośrednią interpretację różnic w zjawiskach związanych z realizacją obiegu roboczego silnika podczas zasilania go tak bardzo różniącymi się paliwami jak olej napędowy, naturalny olej rzepakowy czy estry metylowe oleju rzepakowego RME. W niniejszej publikacji przedstawiono wybrane wyniki badań wizualizacyjnych, termowizji płomienia oraz rozkładu prawdopodobieństwa występowania strugi i/lub płomienia dla wybranych, charakterystycznych faz procesu roboczego silnika wysokoprężnego zasilanego olejem napędowym, olejem opałowym, olejem rzepakowym oraz RME. Celem tego artykułu jest m.in. określenie, na ile metody optyczno-cyfrowe, pozwalające na filmowanie przebiegu wtrysku, samozapłonu i spalania paliwa w cylin-

* Dr inż. Jerzy Cisek, Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej

drze silników wysokoprężnych, mogą ułatwić i pogłębić analizę przyczynowo-skutkową wpływu różnych paliw na przebieg procesu roboczego silnika.

STANOWISKO I METODYKA BADAŃ

W badaniach wykorzystano stanowisko pomiarowe, którego schemat przedstawiono na rys.1. Badawczy, jednocylindrowy silnik wysokoprężny z bezpośrednim wtryskiem paliwa SB3.1. wyposażono we wtryskiwacz z 4-otworowym rozpylaczem o średnicach otworów wylotowych 0,34 mm. Pomiarów wykonywano przy niezmienniej prędkości obrotowej (1600 obr/min – prędkość obrotowa momentu maksymalnego) i stałym obciążeniu silnika, niezależnie od stosowanego paliwa. Stanowisko wyposażono m.in. w aparaturę do pomiaru szybkozmiennych ciśnień w cylindrze silnika i w instalacji wtryskowej (AVL Indimeter), zestaw analizatorów do pomiaru stężeń CO, THC, NO_x (AVL CEBII), stanowisko pomiarowe do emisji cząstek stałych PM oraz system pomiarowy do wizualizacji wtrysku i spalania paliwa w cylindrze silnika (AVL VideoScope). System ten pozwala na archiwizację obrazów rejestrujących przebieg wtrysku i spalania paliwa z częstotliwością do 0,1° kąta obrotu wału korbowego [Cisek 2002]. Dla każdego kąta obrotu wału korbowego wykonywano 10 powtórzeń pomiarów w celu dalszej obróbki statystycznej obrazów (określenia prawdopodobieństwa występowania wtrysku i/lub płomienia). Ponadto, metodą dwu kolorów [Cisek 2002] określano rozkład izoterm w płomieniu dyfuzyjnym w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Dla każdego z badanych paliw (olej napędowy, estry metylowe oleju rzepakowego RME i naturalny olej rzepakowy) określono kolejne fazy wtrysku, samozapłonu i spalania paliwa.

WIZUALIZACJA WTRYSKU I SPALANIA PALIW

Wizualizacja wtrysku i spalania paliwa obejmowała rejestrację obrazów w cylindrze silnika w zakresie od początku wtrysku paliwa do widocznego końca spalania. Częstotliwość próbkowania obrazu wynosiła 1°OWK.

Na fot. 1–7 przedstawiono kolejne fazy wtrysku paliwa, od początku do momentu samozapłonu, dla badanych paliw. Na podstawie sekwencji tak zarchiwizowanych kolejnych faz wtrysku paliwa sporządzono przebiegi zasięgu czoła strugi paliwa (rys. 2), prędkości rozchodzenia się czoła strugi (rys. 3) oraz kąta rozwarcia strugi (rys. 4) w funkcji kąta obrotu wału korbowego.

Należy zwrócić uwagę, że pomiary zasięgu strugi odbywały się w tej metodzie w cylindrze silnika przy zmiennym ciśnieniu i temperaturze czynnika roboczego (w trakcie suwu sprężania), a więc odmiennie niż w trakcie pomiarów pozasilnikowych (pomiarów w bombie ciśnieniowej). Z tego powodu zasięg strugi po uzyskaniu wartości maksymalnej ulegał zmniejszeniu w stopniu zależnym od szybkości odparowania paliwa z czoła strugi.

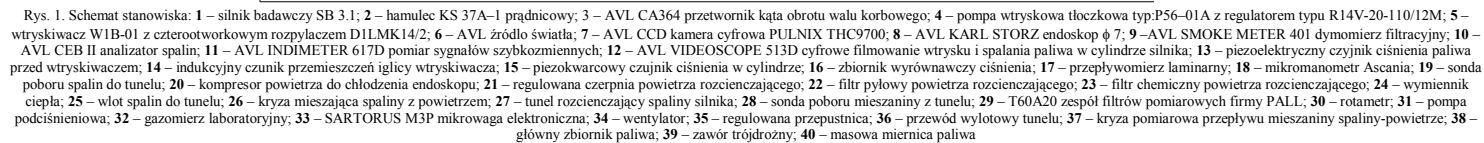
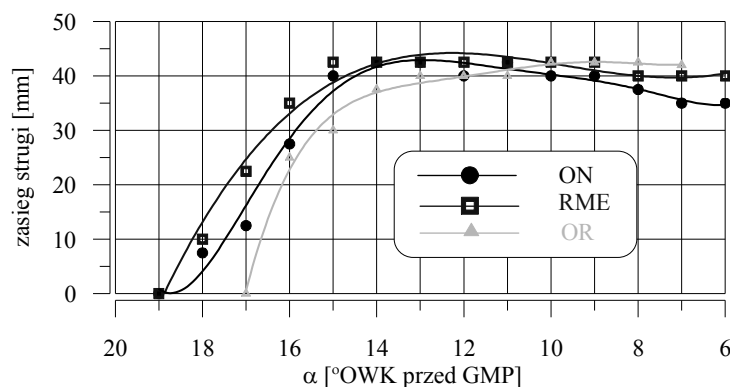
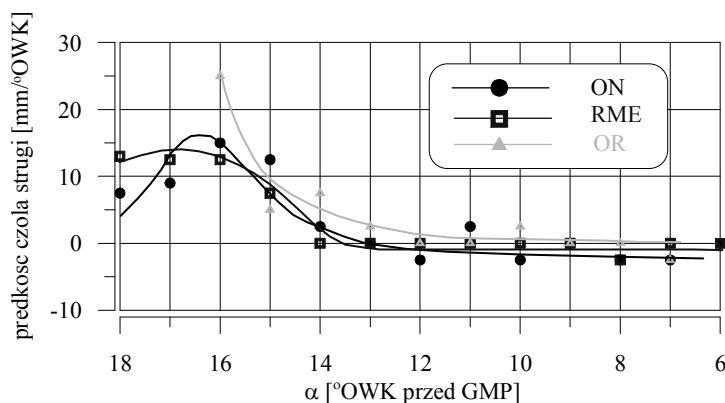


Fig. 1. Draft of the test stand: 1 – SB 3.1 test engine; 2 – KS A-1 generator brake; 3 – AVL CA 364 converter of the camshaft rotational angle; 4 – piston injection pump type P 56-01 A with adjuster type R 14 V-110/12 M; 5 – injector W 1 B-01 with four-hole sprayer DILMK 14/2; 6 – AVL source of light; 7 – AVL CCD digital camera Pulnix THC 9700; 8 – AVL KAR Storz endoscope $\phi 7$; 9 – AVL SMOKE METER 401 fuel smoke meter; 10 – AVL CEB II fume analyzer; 11 – AVL INDIMETER 617 D speed alternating signals measurement; 12 – AVL VIDEOSCOPE 513 D digital video-recording of fuels injection and combustion in an engine cylinder; 13 – piezoelectric fuel pressure sensor in front of injector; 14 – inductive sensor of injector needle movements; 15 – piezoquartz sensor of pressure in a cylinder; 16 – pressure equalizing tank; 17 – laminar flow-meter; 18 – micromanometer Ascania; 19 – fume intake to tunnel probe; 20 – air compressor for endoscope coding; 21 – adjustable diluting air scoop; 22 – diluting air dust filter; 23 – diluting air chemical filter; 24 – heat exchanger; 25 – fume inlet to tunnel; 26 – flange for mixing fumes with air; 27 – tunnel diluting engine fumes; 28 – mix intake from tunnel probe; 29 – T60A20 measuring filters set of the firm PALL; 30 – rotameter; 31 – vacuum pump; 32 – laboratory gas-flow meter; 33 – SARTORUS M3P electronic microscals; 34 – ventilator; 35 – adjustable throttle; 36 – outlet duct from tunnel; 37 – flow measuring flange; 38 – main fuel tank; 39 – three-way valve; 40 – fuel mass gauge



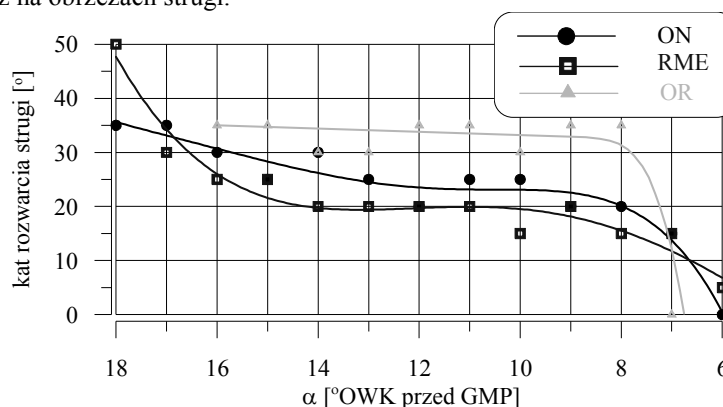
Rys. 2. Zasięg czoła strugi w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla badanych paliw
Fig. 2. Flow head range in the function of camshaft rotational angle for the tested fuels (flow range)



Rys. 3. Zasięg czoła strugi w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla badanych paliw
Fig. 3. Flow head range in the function of camshaft rotational angle for the tested fuels (flow head speed)

Zmniejszanie się zasięgu czoła strugi ciekłego paliwa, w funkcji kąta obrotu wału korbowego, było w końcowych fazach wtrysku największe dla oleju napędowego, zaś dla naturalnego oleju rzepakowego najmniejsze. Wskazywałoby to na największą szybkość parowania z czoła strugi oleju napędowego, mniejszą RME i najmniejszą oleju roślinnego. Jest to związane m.in. z ciepłem parowania tych paliw i prowadzi do odmiennego przygotowania mieszaniny paliwowo-powietrznej do spalania. Prędkość rozprzestrzeniania się czoła strugi paliwa tuż po rozpoczęciu wtrysku była najmniejsza w przypadku oleju napędowego, nieco większa dla RME i największa dla oleju roślinnego. Wynika to zarówno ze zmian prędkości wypływu paliwa z otworów wylotowych rozpylacza, jak również z faktu, iż ze wzrostem lepkości i gęstości tych paliw rośnie rozmiar oraz masa kropeł, a więc i energia kinetyczna kropeł opuszczających rozpylacz. Jednak większe krople paliwa podlegają większym oporom aerodynamicznym i prędkość rozprzestrzeniania się czoła strugi tych paliw ulega gwałtownemu zmniejszeniu do wartości podobnych jak dla oleju napędowego. Kąt rozwarcia strugi był największy dla oleju rzepakowego, co oddziaływałoby korzystnie na mieszanie paliwa z powietrzem, ze względu na większe obszary komory

spalania objęte paliwem, gdyby nie przeważający wówczas wpływ znacznego pogorszenia rozpylenia. Znamienny jest dla naturalnego oleju roślinnego, w odróżnieniu od RME i oleju napędowego, brak zmniejszania się widocznego kąta rozwarcia strugi paliwa do momentu samozapłonu, co wskazuje na pogorszenie wówczas procesu rozpylenia i odparowania paliwa również na obrzeżach strugi.



Rys. 4. Kąt rozwarcia strugi w funkcji kąta obrotu wału korbowego dla badanych paliw
Fig. 4. Flow obtuse angle in the function of camshaft rotational angle for the tested fuels
(flow obtuse angle)

Zmiana rodzaju stosowanego paliwa wiązała się również ze zmianą szeregu innych parametrów wtrysku. Jednym z istotnych parametrów jest powtarzalność wtrysku. Z danych zawartych na fot. 4 (prawdopodobieństwo występowania strugi paliwa) wynika, że olej napędowy charakteryzował się bardzo dobrą powtarzalnością wtrysku. Dotyczy to zarówno zasięgu czoła strugi, kąta stożka rozpylenia, jak i kształtu strugi. W przypadku zasilania silnika estrami metylowymi oleju rzepakowego w czasie trwania wtrysku, wokół jądra strugi paliwa pojawiał się „obłok” bardzo dobrze rozpylonego paliwa (fot. 4). Sprzyjało to późniejszemu spalaniu, z niewielką ilością tlenku węgla, węglowodorów i cząstek stałych oraz małemu zadymieniu spalin. Wtrysk nieprzetworzonego chemicznie oleju rzepakowego charakteryzował się dużą niepowtarzalnością, co w połączeniu z innymi czynnikami sprzyjało wzrostowi ilości tlenku węgla, niespalonych węglowodorów i cząstek stałych w spalinach silnika oraz zmniejszało efektywność spalania [Cisek 1998].

Na fot. 4–7 zarejestrowano obrazy odpowiadające kątom obrotu wału korbowego silnika, charakterystycznym dla wybranych parametrów obiegu roboczego. Do parametrów tych należą: maksymalna prędkość wtrysku paliwa, początek samozapłonu paliwa, maksymalna prędkość spalania kinetycznego i maksymalna temperatura czynnika roboczego.

Z analizy zjawisk zarejestrowanych na przedstawionych fotografiach wynikają istotne wnioski związane z przebiegiem spalania badanych paliw:

1. Obszar objęty płomieniem w chwili samozapłonu paliwa jest największy dla RME, a najmniejszy dla naturalnego oleju rzepakowego. Ma to związek zarówno z widmem rozpylenia (najgorszym dla oleju rzepakowego), jak i z rozpyleniem paliwa w skali makro. Wokół strugi wtryskiwanego RME tworzy się „obłok” bardzo dobrze rozpylonego paliwa (fot. 4–5), które ulega spalaniu w dużej objętości
2. W pierwszej fazie spalania paliwa roślinne charakteryzują się nieco większymi obszarami płomienia objętymi wysokimi temperaturami niż paliwo węglowodorowe (fot. 6).

W przypadku oleju rzepakowego obszar komory spalania objęty dużym prawdopodobieństwem występowania płomienia jest najmniejszy, co związane jest z dużą niepowtarzalnością wtrysku paliwa przed samozapłonem i w trakcie spalania kinetycznego.

3. Przy kącie obrotu wału korbowego odpowiadającym maksymalnej temperaturze czynnika roboczego duży obszar komory spalania objęty jest płomieniem w przypadku wszystkich badanych paliw. Jednak w przypadku paliwa węglowodorowego powierzchnia płomienia określona izotermami o temperaturze 1800 K jest prawie trzykrotnie mniejsza niż w przypadku zasilania silnika estrami metylowymi oleju rzepakowego (fot. 7). Wyjaśnia to duże ilości NO_x tworzone w komorze spalania, jak również potwierdza lepsze warunki do dopalania sadzy i niespalonych węglowodorów niż w przypadku oleju napędowego. Natomiast olej rzepakowy charakteryzuje się wówczas podobnymi jak RME strefami wnętrza cylindra silnika objętymi płomieniem, jednak z temperaturami nieco niższymi niż dla RME.

PODSUMOWANIE

Przedstawiony materiał pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Metody optyczno-cyfrowe dają możliwość bezpośredniej obserwacji wtrysku, samozapłonu i spalania paliwa wewnątrz cylindra, co nie jest możliwe przy innych metodach pomiarowych.
2. Analiza procesu wtrysku paliwa metodami optyczno-cyfrowymi pozwala na określenie szeregu istotnych parametrów związanych z przygotowaniem mieszaniny paliwowo-powietrznej, w tym zasięgu i prędkości czoła strugi, kąta stożka rozpylenia, co jest szczególnie istotne przy analizie pracy rozpylaczy.
3. Wizualizacja wtrysku i spalania paliwa w cylindrze silnika pozwala na określenie niepowtarzalności wtrysku i spalania paliwa w kolejnych obiegach pracy silnika.
4. Optyczny dostęp do komory spalania pozwala na określenie rozkładu izoterm w płomieniu w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika, co jest istotne w badaniach naukowych i rozwojowych silników spalinowych.

PIŚMIENNICTWO

1. **Cisek J. 2002:** Możliwości i ograniczenia wizualizacji procesu wtrysku i spalania w cylindrze silnika wysokoprężnego AUTOPROGRES-KONMOT 2002. Przemysłowy Instytut Motoryzacji. Politechnika Krakowska.
2. **Cisek J. 2002:** Spectral flame temperature measurement in diesel engine using the two-colour method. XXVII Konferencja Slovenských a Českých Vysokých Škol. Katedra Vozidiel a Tepelných Zariadení, Vysoká škola Pol'nohospodárska, Nitra.
3. **Cisek J. 2004:** Options for the Analysis of Fuel Injection using Visual Digitized Methods. Journal of Middle European Construction and Design of Cars, 3, September.
4. **Cisek J. 1998:** Wpływ oleju rzepakowego i jego mieszanin z olejem napędowym na własności silnika wysokoprężnego. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska. Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych. Kraków.

VISUALISATION OF INJECTION AND COMBUSTION
OF RAPESEED FUELS IN DIESEL ENGINE

Summary. This paper presents possibilities of using fully digitised triggerable video system AVL VideoScope 513D for analysis of rapeseed fuels injection and combustion inside diesel engine cylinder. As a research objects were used: standard diesel fuel, rapeseed methyl ester (RME) and rapeseed oil. Using one-cylinder test diesel engine with systems for visualization the injection and combustion phenomena were described and compared.

Key words: diesel engine, rapeseed oil, RME, injection, combustion, visualization

Recenzent: prof. dr hab. Cezary Bocheński