

ANALIZA WIELKOŚCI SZYBKOSMIENNYCH SILNIKA AD3.152 UR ZASILANEGO PALIWEM MINERALNYM, PALIWEM POCHODZENIA ROŚLINNEGO I ICH MIESZANINAMI

Andrzej Ambrozik, Dariusz Kurczyński

Katedra Maszyn Ciepłych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach

Streszczenie. Właściwości fizyko-chemiczne paliwa mają wpływ na przebieg procesu wtrysku paliwa i procesu spalania. W artykule przedstawiono wpływ rodzaju paliwa na przebiegi wielkości szybkozmiennych silnika takich jak: ciśnienie w cylindrze, ciśnienie paliwa w przewodzie wtryskowym i wznios iglicy wtryskiwacza. Podczas badań hamownianych silnik o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR pracował według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Silnik zasilano olejem napędowym Ekodiesel Ultra D (ON), estrami metylo- wymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i mieszaninami tych paliw o zawartości estrów 20% (B20) i 30% (B30). Na podstawie wyznaczonych przebiegów wielkości szybkozmiennych obliczono wybrane parametry procesu wtrysku paliwa i procesu spalania badanego silnika.

Słowa kluczowe: tłokowy silnik spalinowy, paliwa silnikowe, paliwa węglowodorowe, paliwa pochodzenia roślinnego, wielkości szybkozmiennne tłokowego silnika spalinowego.

WSTĘP

Wymagania stawiane współczesnym silnikom są bardzo wygórowane. Względy ekologiczne, ekonomiczne i energetyczne wymuszają konieczność dalszego doskonalenia tłokowych silników spalinowych [4]. Na obecnym poziomie ich technicznego rozwoju jedną z możliwości dalszego rozwoju silnika spalinowego jest doskonalenie przebiegu procesów zachodzących w jego cylindrze. Wymaga to szczegółowego poznania tych procesów w pracujących silnikach. Wyniki eksperymentalnych badań procesów roboczych silników spalinowych mogą być źródłem wiedzy pozwalającej na opracowanie modeli matematycznych symulujących przebieg zjawisk zachodzących w silniku. Analiza procesów zachodzących w silniku prowadzona na podstawie opracowanych modeli matematycznych może być bardzo przydatna w doskonaleniu tych procesów. Optymalizacja procesu spalania wymieniana jest jako główny środek ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin i zmniejszenia zużycia paliwa.

Spośród eksperymentalnych metod badań procesów roboczych zachodzących w cylindrach tłokowych silników spalinowych można wyróżnić:

➤ indykowanie silnika – pomiar przebiegu zmian ciśnienia w cylindrze silnika uzupełniany pomiarami: przebiegu zmian ciśnienia wtrysku paliwa, wzniosu iglicy wtryskiwacza i wzniosu zaworów, w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika lub położenia tłoka w cylindrze [11],

➤ badania optyczne obejmujące wizualizacje procesów zachodzących w przestrzeni roboczej silnika [3, 5, 12].

Indykowanie silnika jest metodą badań eksperymentalnych, znaną już w czasach opracowywania silników parowych. Nikolaus August Otto dokonał pomiarów ciśnienia w pierwszym skonstruowanym przez siebie silniku. Obecnie indykowanie jest metodą powszechnie stosowaną. Pomiarów wielkości szybkozmiennych w silnikach produkowanych seryjnie można dokonywać bez wprowadzania w nich zmian konstrukcyjnych, które mogłyby istotnie zmieniać własności silnika. Według [11] indykownie jest wiarygodną i powtarzalną procedurą badawczą, dostarczającą dokładnych informacji o rzeczywistych procesach zachodzących w silniku. Pozwala ono na rejestrację chwilowych wartości parametrów procesów zachodzących w cylindrze i umożliwia analizę wpływu różnych czynników na ich przebieg. Informacje uzyskane z indykowania cylindra silnika są podstawą do diagnozowania i optymalizacji procesu spalania oraz pozwalają na jakościową ocenę jego pracy. Rozwój systemów komputerowych oraz czujników pomiarowych sprawił, że pomiar szybkozmiennych wielkości silnika, w szczególności ciśnienia w cylindrze, spełnia wymagania stawiane w zakresie dokładności pomiarów. Dokładność ta umożliwia otrzymanie istotnych i wiarygodnych wielkości oceniających pracę silników. Indykowanie ciśnienia w cylindrze stało się obecnie standardową metodą badawczą stosowaną w dziedzinie tłokowych silników spalinowych.

Optyczne metody badań procesów zachodzących w cylindrze silnika są rzadziej stosowane. Zastosowanie ich w rzeczywistych silnikach jest utrudnione, ponieważ wymaga to odpowiedniego przygotowania silnika. Obecnie najczęściej do tego typu badań wykorzystuje się silniki badawcze o specjalnej konstrukcji. Najnowszą i nadal rozwijaną techniką badań optycznych jest technika wideo. Stwarza ona możliwości badań procesu spalania w pracujących silnikach rzeczywistych [12]. Wizualizacja płomienia podczas pracy silnika może być bardzo ważnym źródłem informacji o przebiegu procesu spalania. Analiza zdjęć obrazujących przebieg procesów w cylindrze silnika pozwala na ocenę zjawisk zachodzących wewnątrz cylindra. Racjonalną procedurą badawczą procesów roboczych tłokowych silników spalinowych jest zastosowanie do badań silnika zarówno indykowania, jak i wizualizacji procesów zachodzących wewnątrz cylindra silnika. Pozwala to na otrzymanie wyników, które przy zastosowaniu jednej z wymienionych metod są niemożliwe do uzyskania. Dlatego też optyczne badania przebiegu procesów zachodzących w cylindrze silnika są coraz częściej stosowane. Celem tych badań najczęściej jest określenie następujących wielkości [12]: składowych wektora prędkości przepływu czynnika, kierunku i intensywności zawirowania ładunku, geometrii, prędkości rozprzestrzeniania i penetracji strugi wtryskiwanego paliwa, struktury rozpylenia i dynamiki ruchu kropel, chwili i miejsc wystąpienia ognisk zapłonu, miejsc tworzenia się frontu płomienia, kierunku i prędkości jego rozprzestrzeniania, wielkości, geometrii i powierzchni obszaru objętego płomieniem, turbulencji w płomieniu, tworzenie sadzy, rozkładu temperatury w komorze spalania, miejscowego składu chemicznego ładunku.

CEL I ZAKRES PRACY

Badania eksperymentalne, których wyniki przedstawiono w niniejszej pracy, wykonano na hamowni silnikowej. Podczas badań silnik o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR pracował według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej i zasilany był różnymi paliwami. Celem badań było określenie wpływu zastosowania estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i ich mieszanin z olejem napędowym na przebiegi wielkości szybkozmiennych badanego silnika: ciśnienia w cylindrze, ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wznios iglicy wtryskiwacza oraz na wybrane parametry procesu wtrysku paliwa i procesu spalania. W każdym punkcie

pomiarowym, w ustalonych warunkach pracy silnika rejestrowano przebiegi ciśnienia w cylindrze silnika, ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wzniosu iglicy wtryskiwacza dla kolejnych pięćdziesięciu cykli jego pracy w funkcji kąta obrotu wału korbowego silnika. Do dalszej analizy wykorzystano przebiegi uśrednione z pięćdziesięciu kolejnych cykli pracy silnika.

OBIEKT BADAŃ I STANOWISKO BADAWCZE

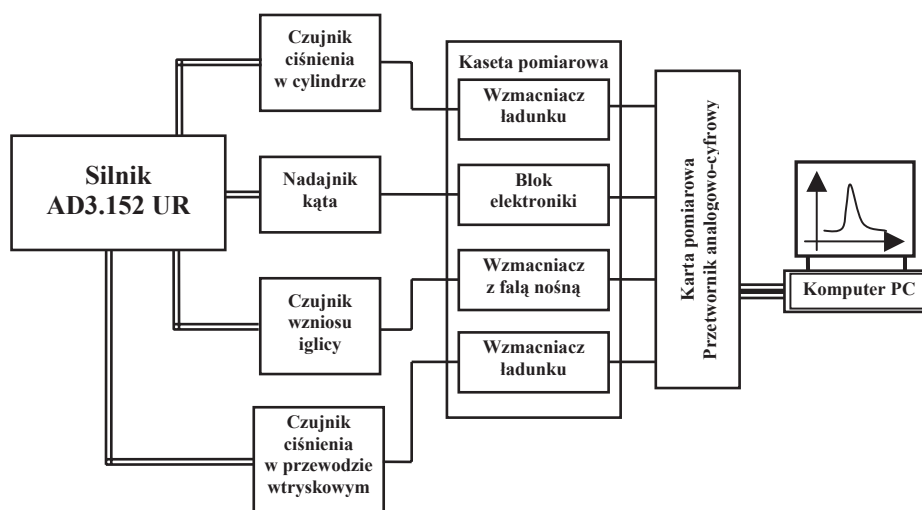
Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu silnika Perkins AD3.152 UR. Jest to trzycylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania, usytuowanej w denku tłoka. Badany silnik wyposażony był w układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową typu DPA z mechanicznym regulatorem obrotów. Paliwo doprowadzane jest do cylindrów silnika AD3.152 UR poprzez czterootworowe rozpylacze. Parametry charakterystyczne i dane techniczne badanego silnika AD3.152 UR przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Podstawowe dane techniczne badanego silnika
Tab. 1. Basic technical data of the engine

Silnik o zapłonie samoczynnym Perkins AD3.152 UR		
Parametr	Jednostka	Wartość
Układ cylindrów	-	rzędowy
Liczba cylindrów, c	-	3
Rodzaj wtrysku	-	bezpośredni
Stopień sprężania, ε	-	16,5
Średnica cylindra, D	mm	91,44
Skok tłoka, S	mm	127
Pojemność skokowa silnika, V_{ss}	dm ³	2,502
Nominalna moc silnika, N_e	kW	34,6
Prędkość obrotowa mocy nominalnej, n_N	obr/min	2250
Maksymalny moment obrotowy silnika, M_o	Nm	165,4
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu, n_M	obr/min	1300÷1400
Statyczny kąt wyprzedzenia wtrysku paliwa, α_{ww}	°OWK	17

Badania wykonano na stanowisku hamownianym składającym się z silnika wysokoprężnego AD3.152, hamulca wodnego i szafy kontrolno-pomiarowej, służącej do sterowania stanowiskiem i pozwalającej na odczyt parametrów pracy silnika i hamulca. Stanowisko badawcze wyposażone było w system do indykowania silnika, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Przedstawiony system pomiarowy składał się z czterech torów pomiarowych: toru pomiarowego ciśnienia w komorze spalania, toru pomiarowego ciśnienia w przewodzie wtryskowym, toru pomiarowego wzniosu iglicy wtryskiwacza, toru dekodera kąta obrotu wału korbowego [4]. Tor pomiarowy ciśnienia w komorze spalania składał się z czujnika piezokwarcowego QC34D firmy AVL Austria chłodzonego cieczą, przewodów łączących i wzmacniacza ładunku typu CL 111 firmy ZEPWN Marki. Elementami toru pomiarowego ciśnienia w przewodzie wtryskowym były: czujnik piezokwarcowy typu CL 31 firmy ZEPWN Marki, przewody łączące i wzmacniacz ładunku typu CL 111. Zastosowane w tych torach pomiarowych czujniki piezokwarcowe przetwarzają sygnał ciśnienia na ładunek elektryczny. W skład toru pomiarowego wzniosu iglicy wtryskiwacza wchodził induk-

cyjny czujnik przemieszczeń typu CL 80 firmy ZEPWN Marki, przewody łączące i wzmacniacz z falą nośną typu CL 104F firmy ZEPWN Marki. Wielkości mierzone przez wyżej wymienione czujniki rejestrowano w funkcji kąta obrotu wału korbowego. W systemie pomiarowym umożliwia to tor pomiarowy kąta obrotu wału korbowego, w którego skład wchodzi przetwornik obrotowo-impulsowy PFI60 firmy INTROL Poznań oraz układ znakowania i synchronizacji położenia wału korbowego firmy ZEPWN Marki, który inicjuje pojedynczy impuls rozpoczynający pomiary i generujący ciąg impulsów wyzwalających pojedyncze pomiary co pewien, określony kąt $\Delta\alpha$. Przetwornik obrotowo-impulsowy PFI60 służy do zamiany obrotu wału korbowego na impulsy napięciowe we wzmacniaczu ładunku, których ilość proporcjonalna jest do przebytej drogi kątowej wałka-osi przetwornika i jego rozdzielczości. Zadaniem wzmacniaczy zainstalowanych w torach pomiarowych jest wzmocnienie i przetworzenie sygnałów wygenerowanych przez czujniki na sygnały napięciowe. Wszystkie wzmacniacze zastosowane w systemie oraz wspomniany układ znakowania OWK i synchronizacji położenia wału korbowego umieszczone są w kasecie pomiarowej CLEU firmy ZEPWN Marki. Sygnały napięciowe wzmacniaczy przetwarzane są przez przetwornik analogowo-cyfrowy typu KPCI-3110 firmy Keithley Instruments Inc na wielkości cyfrowe, zapisywane w pamięci komputera.



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowego parametrów szybkozmiennych tłokowego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym, wykorzystany do przeprowadzenia badań [1]

Fig. 1. Block diagram of the measurement system for fast-changing parameters of the self-ignition piston internal combustion engine used for tests [1]

PALIWA ZASTOSOWANE DO BADAŃ

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano dwa podstawowe paliwa różnego pochodzenia: paliwo węglowodorowe – olej napędowy Ekodiesel Ultra D i paliwo roślinne – estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME. Olej napędowy Ekodiesel Ultra D produkowany przez Polski Koncern Naftowy Orlen S.A. jest paliwem węglowodorowym nowej generacji, o podwyższonych parametrach użytkowych i ekologicznych, przeznaczonym do zasilania szybkoobrotowych silników o zapłonie samoczynnym. Spełnia on wymagania normy

PN-EN 590:2005 [7, 10], zgodnej z najnowszą edycją normy europejskiej EN 590:2004, określającej wymagania jakościowe olei napędowych. Zawartość siarki w tym paliwie jest mniejsza niż wymagania mające obowiązywać w Unii Europejskiej od 2009 r. Ponadto charakteryzuje się on obniżoną temperaturą końca procesu destylacji, obniżoną zawartością węglowodorów aromatycznych, małą zawartością zanieczyszczeń stałych, podwyższoną liczbą cetanową. Drugim paliwem stosowanym w badaniach było paliwo roślinne FAME, będące mieszaniną estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, produkowane w Rafinerii Trzebinia S.A.. Jest to paliwo uzyskiwane w procesie transestryfikacji triglicerydów oleju rzepakowego metanolem. W wyniku tej reakcji uzyskuje się mieszaninę estrów metylowych kwasów tłuszczowych oraz frakcję glicerynową [2, 9]. Paliwo to spełnia wymagania normy PN-EN 14214 [6, 8], która jest zgodna z normą europejską określającą wymagania dla estrów metylowych kwasów tłuszczowych stosowanych jako biopaliwo lub jako dodatek do olei napędowych. Wykorzystane do badań paliwo roślinne ma podobną do oleju napędowego Ekodiesel Ultra D liczbę cetanową, większą gęstość, mniejszą wartość opałową, większą temperaturę mętnienia i zablokowania zimnego filtra. Paliwo roślinne FAME zawiera w składzie elementarnym 11% tlenu. Ponadto charakteryzuje się ono dobrymi właściwościami smarnymi. FAME nie zawiera związków lotnych, co wpływa na jego niskie ciśnienie par nasyconych i wysoką temperaturę zapłonu. Wysoka temperatura zapłonu estrów zapobiega możliwości wybuchu par i tym samym zapewnia bezpieczeństwo podczas stosowania tego paliwa. Zastosowanie specjalnych dodatków umożliwia zastosowanie estrów w czystej postaci, w warunkach zimowych w temperaturze ok. -20°C. Podstawowe właściwości fizykochemiczne badanych paliw przedstawiono w tab. 2. Do badań eksperymentalnych zastosowano również mieszaniny estrów metylowych oleju rzepakowego FAME i oleju napędowego o zawartości estrów 20% (V/V) i 30% (V/V). Mieszaniny te oznaczono symbolami B20 i B30.

Tab. 2. Podstawowe właściwości fizykochemiczne paliw silnikowych wykorzystanych w badaniach [8, 10]

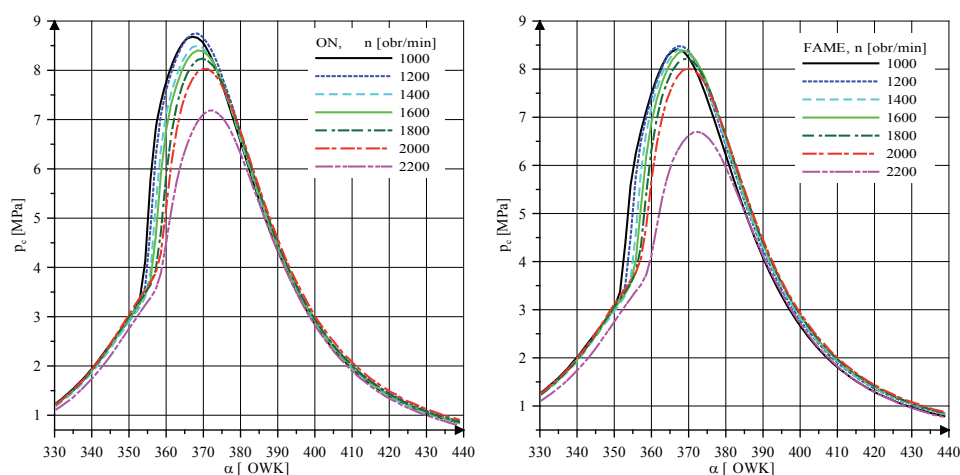
Tab. 2. Basic physical and chemical properties of engine fuels used in investigations [8, 10]

Parametr	Olej napędowy Ekodiesel Ultra D	Paliwo roślinne FAME
Liczba cetanowa	51,4	51
Wartość opałowa [MJ/kg]	43,2	36,7
Gęstość w temperaturze 15°C [g/cm ³],	0,8354	0,883
Lepkość kinematyczna [mm ² /s] (~40°C)	2,64	4,47
Napięcie powierzchniowe [N/m] (20°C)	3,64·10 ⁻²	3,58·10 ⁻²
Temperatura zapłonu [°C]	63	pow. 130
Temperatura mętnienia [°C]	-17	-2
Temperatura zablokowania zimnego filtra [°C]	-23	-14
Przeciętny skład elementarny [%]		
– C	87,2	76,8
– H	12,7	12,1
– O	0	11
Zawartość siarki S [mg/kg]	9	8,1
Zawartość wody [mg/kg]	43,8	113
Zawartość zanieczyszczeń stałych [mg/kg]	5	18
Pozostałość po koksowaniu w 10-procentowej pozostałości destylacyjnej [% (m/m)]	0,01	0,28
Badania działania korodującego na płytkach miedzi [klasa]	1	1

WYNIKI BADAŃ

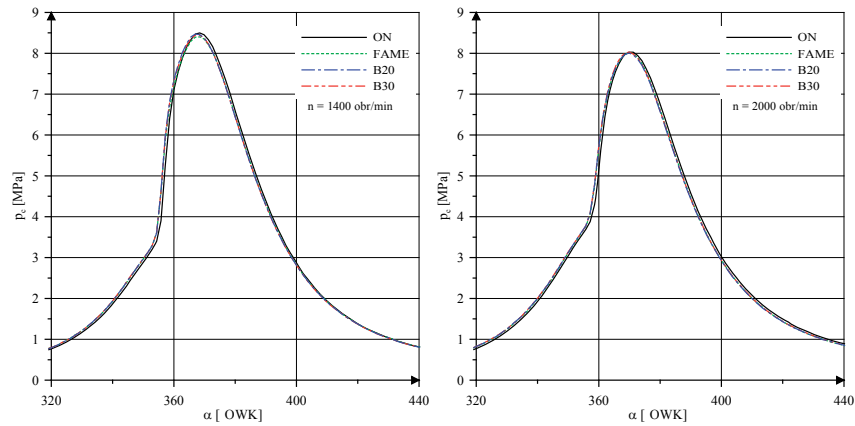
Podczas badań silnika AD3.152 UR, pracującego w różnych warunkach prędkościowo-obciążeniowych dokonywano pomiarów ciśnienia w cylindrze silnika w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Na rys. 2 pokazano wykresy ciśnienia w cylindrze p_c silnika AD3.152 UR pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME, dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $\alpha_{ww} = 17^\circ \text{OWK}$. Pomiarów dokonano dla prędkości obrotowych 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 i 2200 obr/min. Największe wartości ciśnienia w cylindrze silnika, w czasie procesu spalania, uzyskano dla prędkości obrotowej 1200 obr/min. Ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego powyżej 1200 obr/min ciśnienia maksymalne w cylindrze silnika maleją.

Na rys. 3 przedstawiono porównanie wykresów indyktorowych silnika AD3.152 UR pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, wyznaczonych dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D, estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i paliwami B20 i B30. Krzywe obrazujące przebieg ciśnienia w cylindrze silnika podczas procesu sprężania i rozprężania przy zasilaniu silnika estrami i paliwami B20, B30 są przesunięte w lewo w stosunku do odpowiednich krzywych przedstawiających zmianę ciśnienia przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Świadczy to o tym, że przy zasilaniu silnika estrami oraz paliwami B20 i B30, przy tym samym ustawieniu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, nieco wcześniej następuje samozapłon mieszanki paliwowo-powietrznej niż przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Zgodnie z wykresami pokazanymi na rys. 3 maksymalne ciśnienia procesu spalania są nieznacznie większe przy zasilaniu silnika olejem napędowym, niż przy zasilaniu go estrami oleju rzepakowego FAME.



Rys. 2. Przebiegi ciśnienia w cylindrze p_c silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME

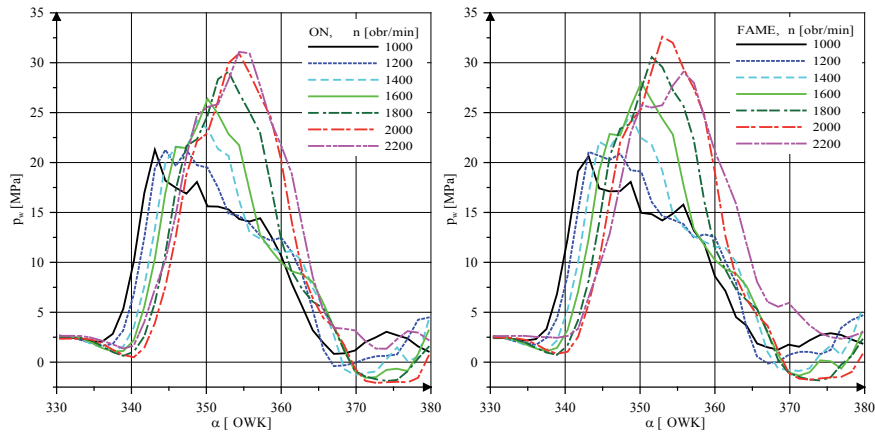
Fig. 2. Pressure patterns in the p_c cylinder of AD3.152 UR engine that operated in external speed characteristics and was fuelled by Ekodiesel Ultra D diesel oil and Rapeseed oil Fatty Acid Methyl Esters FAME



Rys. 3. Porównanie przebiegów ciśnienia w cylindrze p_c silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min, przy zasilaniu go paliwami: ON, FAME, B20 i B30

Fig. 3. Comparison of pressure patterns in the p_c cylinder of AD3.152 UR engine operating in external speed characteristics, fuelled by DO, FAME, B20 and B30, for the rotational speed of 1400 and 2000 rpm

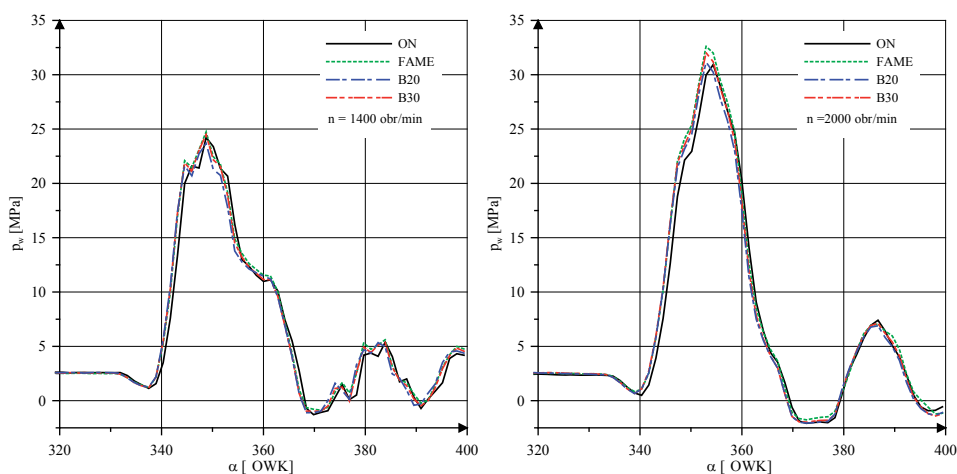
Na rys. 4 pokazano przebiegi ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym p_w silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME, dla kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa $\alpha_{ww} = 17^\circ \text{OWK}$. Ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika wzrastają maksymalne ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym.



Rys. 4. Przebiegi ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym p_w silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME

Fig. 4. Fuel pressure patterns in the p_w injection pipe of AD3.152 UR engine that operated in external speed characteristics and was fuelled by Ekodiesel Ultra D diesel oil and Rapeseed oil Fatty Acid Methyl Esters FAME

Na rys. 5 przedstawiono porównanie przebiegów ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go wybranymi do badań paliwami. Krzywe obrazujące przebieg ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym silnika podczas procesu wtrysku, przy zasilaniu silnika estrami i paliwami B20 i B30, są przesunięte w lewo w stosunku do krzywej przedstawiającej zmianę ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Świadczy to o tym, że przy zasilaniu silnika paliwami: FAME, B20 i B30, przy tym samym ustawieniu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, nieco wcześniej rozpoczyna się wtrysk paliwa niż przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Zgodnie z wykresami pokazanymi na rys. 5, maksymalne ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym, uzyskane dla prędkości obrotowej 1200, są podobne przy zasilaniu silnika wymienionymi paliwami. Przy wzroście prędkości obrotowych maksymalne ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym są wyraźnie większe przy zasilaniu silnika estrami oraz paliwami B20 i B30, w porównaniu z zasilaniem go olejem napędowym.



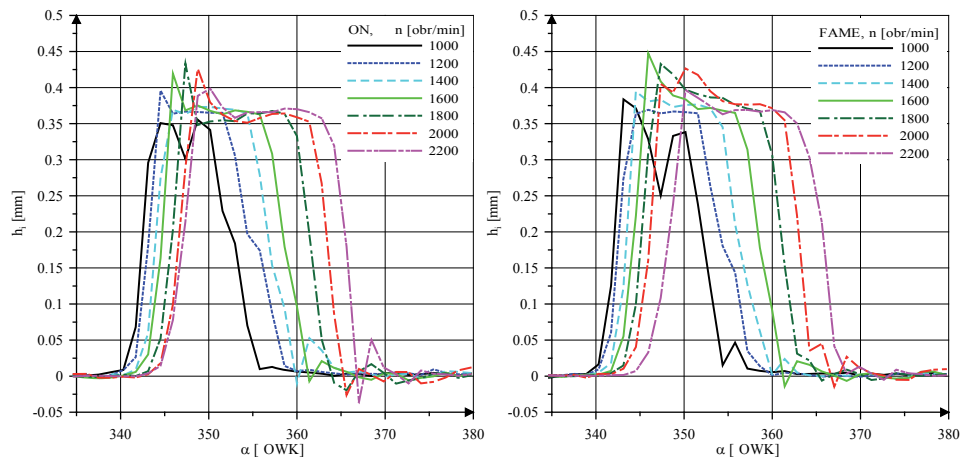
Rys. 5. Porównanie przebiegów ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym p_w silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min, przy zasilaniu go paliwami: ON, FAME, B30, B20

Fig. 5. Comparison of fuel pressure patterns in the p_w injection pipe of AD3.152 UR engine operating in external speed characteristics, fuelled by DO, FAME, B20 and B30, for the rotational speed of 1400 and 2000 rpm

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi wzniosu iglicy wtryskiwacza silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME. Ze wzrostem prędkości obrotowej wału korbowego silnika wzrastają pola pod krzywymi przedstawiającymi przebiegi wzniosu iglicy wtryskiwacza, czyli rośnie ilość paliwa wtryskiwanego do cylindra silnika.

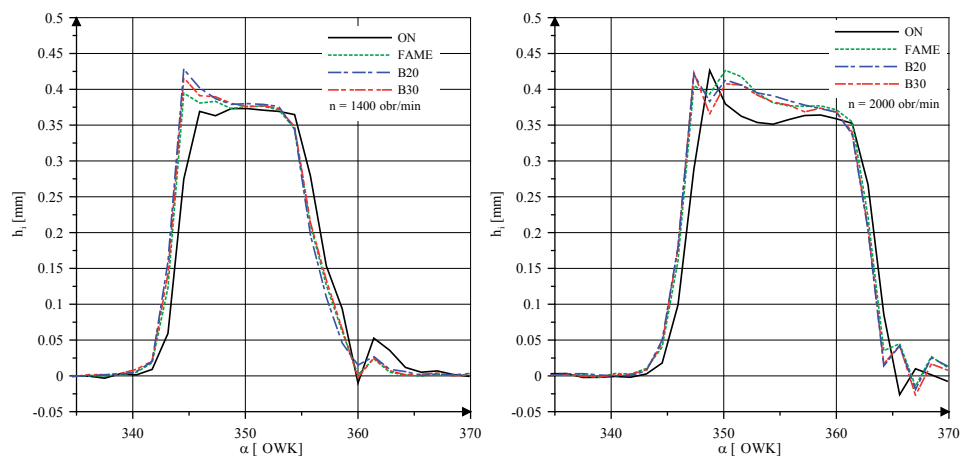
Na rys. 7 przedstawiono porównanie przebiegów wzniosu iglicy wtryskiwacza silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go paliwami: ON, FAME, B20 i B30. Krzywe obrazujące przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza silnika podczas procesu wtrysku przy zasilaniu silnika estrami oraz paliwami B20 i B30 są przesunięte w lewo w stosunku do krzywej przedstawiającej przebieg wzniosu iglicy wtryskiwacza przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Z wykresów wzniosu iglicy wtryskiwacza, wyznaczo-

nych dla prędkości obrotowej 1400 obr/min, widać, że maksymalne wzniosy iglicy wtryskiwacza są większe przy zasilaniu silnika paliwami: FAME, B20 i B30, niż przy jego zasilaniu olejem napędowym. Dla prędkości obrotowej 2000 obr/min maksymalne wzniosy iglicy wtryskiwacza uzyskały zbliżone wartości.



Rys. 6. Przebiegi wzniosu iglicy wtryskiwacza h_i silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME

Fig. 6. Patterns of the h_i injector needle lift in AD3.152 UR engine that operated in external speed characteristics and was fuelled by Ekodiesel Ultra D diesel oil and Rapeseed oil Fatty Acid Methyl Esters FAME



Rys. 7. Porównanie przebiegów wzniosu iglicy wtryskiwacza h_i silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min, przy zasilaniu go paliwami: ON, FAME, B30, B20

Fig. 7. Comparison of patterns of the h_i injector needle lift in AD3.152 UR engine operating in external speed characteristics, fuelled by DO, FAME, B20 and B30, for the rotational speed of 1400 and 2000 rpm

Na podstawie uśrednionych wykresów ciśnienia w przewodzie wtryskowym, przebiegów wzniosu iglicy wtryskiwacza oraz przebiegów ciśnienia w cylindrze silnika wyznaczono dla silnika AD3.152 UR wybrane wskaźniki procesu wtrysku paliwa i procesu spalania: kąt początku wtrysku paliwa α_{pw} , kąt końca wtrysku paliwa α_{kw} , kąt trwania wtrysku paliwa α_w , maksymalne ciśnienie paliwa w przewodzie wtryskowym p_{wmax} , maksymalny wznios iglicy wtryskiwacza h_{max} , kąt początku spalania α_{ps} , kąt opóźnienia samozapłonu α_{os} , maksymalne ciśnienie procesu spalania p_z i maksymalna prędkość narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$ w cylindrze silnika. W tab. 3 przedstawiono wartości wyżej wymienionych wskaźników procesu spalania w cylindrze silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go paliwami: olejem napędowym Ekodiesel Ultra D (ON), estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i mieszaninami tych paliw o zawartości estrów 20% (B20) i 30% (B30).

Tab. 3. Wybrane wskaźniki procesu wtrysku paliwa i procesu spalania w cylindrze silnika AD3.152 UR, pracującego według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, przy zasilaniu go paliwami: ON, FAME, B20, B30

Tab. 3. Selected parameters of fuel injection and combustion processes in AD3.152 UR engine operating in external speed characteristics and fuelled by DO, FAME, B20 and B30

n	paliwo	α_{pw}	α_{kw}	α_w	p_{wmax}	h_{max}	α_{ps}	α_{os}	p_z	$(dp/d\alpha)_{max}$
obr/min		°OWK	°OWK	°OWK	MPa	mm	°OWK	°OWK	MPa	MPa/°OWK
1000	ON	341,3	355,9	14,6	21,283	0,3550	349,6	8,3	8,682	1,171
	FAME	340,8	354,5	13,7	20,625	0,3837	348,4	7,6	8,411	0,859
	B20	340,7	354,7	14,0	20,086	0,390	347,8	7,1	8,536	1,034
	B30	340,6	354,8	14,2	20,051	0,3900	347,2	6,6	8,505	0,964
1200	ON	341,9	359,1	17,2	21,276	0,3959	349,2	7,3	8,747	1,056
	FAME	341,4	360,0	18,6	21,066	0,3692	348,4	7,0	8,475	0,901
	B20	341,3	360,0	18,7	20,701	0,370	348,8	7,5	8,643	1,028
	B30	341,3	358,9	17,6	21,230	0,3681	349,6	8,3	8,597	0,978
1400	ON	342,9	359,7	16,8	24,218	0,3731	351,2	8,3	8,497	0,962
	FAME	342,2	360,1	17,9	24,739	0,3946	350,2	8,0	8,401	0,921
	B20	342,0	360,0	18,0	23,676	0,428	349,8	7,8	8,473	0,965
	B30	342,1	359,9	17,8	24,497	0,4161	350,1	8,0	8,446	0,952
1600	ON	343,3	361,2	17,9	26,390	0,4194	352,4	9,1	8,402	0,915
	FAME	342,9	361,1	18,2	28,025	0,4476	351,2	8,3	8,387	0,805
	B20	342,8	361,1	18,3	26,646	0,435	351,6	8,8	8,433	0,838
	B30	342,7	361,1	18,4	27,552	0,4325	351,6	8,9	8,383	0,826
1800	ON	344,3	363,9	19,6	29,102	0,4335	353,8	9,5	8,236	0,799
	FAME	343,7	365,2	21,5	30,570	0,4327	352,4	8,7	8,215	0,765
	B20	343,5	362,6	19,1	29,286	0,413	352,8	9,2	8,229	0,785
	B30	343,4	362,4	19,0	29,852	0,3968	352,6	9,2	8,234	0,799
2000	ON	345,1	365,1	20,0	30,930	0,4263	354,4	9,3	8,026	0,654
	FAME	344,5	366,6	22,1	32,611	0,4265	354,0	9,5	8,012	0,677
	B20	344,3	364,5	20,2	31,166	0,421	354,0	9,6	8,007	0,674
	B30	344,4	366,4	22,0	32,020	0,4232	353,8	9,4	8,029	0,679
2200	ON	345,3	366,7	21,4	31,078	0,3986	354,8	9,5	7,185	0,479
	FAME	346,1	368,5	22,4	29,072	0,3965	355,6	9,5	6,695	0,424
	B20	344,9	366,5	21,6	31,909	0,437	354,2	9,3	7,484	0,508
	B30	345,6	367,2	21,6	30,320	0,4278	355,0	9,4	7,003	0,486

WNIOSKI

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu zastosowania estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME oraz ich mieszanin z olejem napędowym (paliw: B20 i B30) na przebiegi: ciśnienia w cylindrze badanego silnika, ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym i wznios iglicy wtryskiwacza, oraz na wybrane parametry procesu wtrysku paliwa i procesu spalania. Otrzymane wyniki badań dla paliw wymienionych powyżej porównywano z wynikami uzyskanymi przy zasilaniu silnika olejem napędowym Ekodiesel Ultra D.

Zasilając silnik estrami oleju rzepakowego oraz paliwami B20 i B30, przy tym samym ustawieniu kąta wyprzedzenia wtrysku paliwa, nieznacznie wcześniej unosi się iglica wtryskiwacza, niż przy zasilaniu silnika olejem napędowym. Z tego wynika, że kąt początku wtrysku dla tych paliw ma miejsce wcześniej niż dla oleju napędowego. Jest to skutkiem większej gęstości i lepkości estrów w porównaniu z olejem napędowym. Mniejsza ściśliwość oraz mniejsze przecieki w układzie wtryskowym przy zasilaniu silnika estrami oraz ich mieszaninami z olejem napędowym powodują, że w przypadku zasilania silnika tymi paliwami następuje wcześniejszy przyrost ciśnienia w przewodzie wtryskowym, w porównaniu z przyrostem ciśnienia podczas wtrysku oleju napędowego. Następstwem tego jest to, że przy zasilaniu silnika paliwami FAME, B20 i B30 początek procesu spalania ma miejsce nieznacznie wcześniej niż w przypadku zasilania silnika olejem napędowym.

Kąty początku wtrysku paliwa i kąty końca wtrysku paliwa były określane na podstawie przebiegów wzniosu iglicy wtryskiwacza, rejestrowanych w czasie pomiarów ciśnienia w cylindrze silnika. Dysponując wartościami tych kątów, określono kąty trwania wtrysku przy zasilaniu silnika badanymi paliwami. Przy zasilaniu silnika estrami oraz paliwami B20 i B30 uzyskano nieznacznie większe kąty trwania wtrysku w porównaniu z olejem napędowym. W większości punktów pomiarowych, zasilając silnik estrami i paliwami B20, B30, otrzymano większe maksymalne ciśnienia wtrysku paliwa. Jest to wyraźnie widoczne zwłaszcza przy większych prędkościach obrotowych silnika. Maksymalne wartości ciśnień podczas procesu spalania, przy zasilaniu silnika paliwami: FAME, B20 i B30 oraz przy jego pracy według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej, są mniejsze niż przy zasilaniu go olejem napędowym. Dla analizowanych warunków pracy silnika obliczono maksymalne prędkości narastania ciśnienia $(dp/d\alpha)_{max}$. Przy pracy silnika według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej wartości te były większe przy zasilaniu silnika olejem napędowym w porównaniu z zasilaniem go estrami. Na podstawie wykresów wzniosu iglicy wtryskiwacza oraz przebiegów prędkości narastania ciśnienia w cylindrze wyznaczono kąty opóźnienia samozapłonu przy zasilaniu silnika badanymi paliwami. Różnice pomiędzy wyznaczonymi wartościami kątów opóźnienia samozapłonu, przy zasilaniu silnika paliwami: ON, FAME, B20 i B30, były w granicach 1° OWK. Kąty opóźnienia samozapłonu były nieznacznie mniejsze przy zasilaniu silnika estrami metylowymi oleju rzepakowego FAME oraz paliwami B20 i B30.

Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analiz można stwierdzić, że celowa byłaby zmiana parametrów regulacyjnych układu zasilania badanego silnika, przy zasilaniu go estrami oraz również mieszaninami estrów i oleju napędowego, w porównaniu z ustawieniami fabrycznymi charakterystycznymi dla zasilania silnika olejem napędowym.

BIBLIOGRAFIA

Ambrozik A., Kurczyński D. 2007: Wpływ paliw mineralnych, roślinnych i ich mieszanin na wskaźniki pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Second International Congress on Combustion Engines,

- PTNSS KONGRES – 2007 The Development of Combustion Engines, Publikacja: Silniki Spalinowe 2007-SC2, Kraków, s. 25-34.
- Bocheński C. I. 2003: Biodiesel paliwa rolnicze. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Cisek J. 2005: Wizualizacja wtrysku i spalania paliw rzepakowych w silniku wysokoprężnym. MOTROL Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, Tom 7, Lublin, s. 69-75.
- Kurczyński D. 2007: Wpływ paliw roślinnych i ich mieszanin z olejem napędowym na wskaźniki pracy silnika o zapłonie samoczynnym. Praca doktorska, Kielce.
- Oppenheim A. K. 2004: Combustion in piston engines. Springer Verlag.
- PN-EN 14214 Paliwa do pojazdów samochodowych. Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) do silników o zapłonie samoczynnym (Diesla). Wymagania i metody badań.
- PN-EN 590:2005 Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań.
- Sprawozdanie z badań 5120402 wyrobu BODIESELA D-FAME, Zleceniodawca: Rafineria Trzebinia S.A.
- Szlachta Z. 2002: Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Świadectwo Jakości Nr BM-101/209a/2005 oleju napędowego Ekodiesel Ultra D.
- Wimmer A., Glaser J. 2004: Indykowanie silnika. Wydanie polskie, AVL List GmbH, Przedstawicielstwo w Polsce, Warszawa.
- Wisłocki K. 2004: Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.

ANALYSIS OF FAST-CHANGING QUANTITIES IN THE AD3.152 UR ENGINE RUNNING ON MINERAL FUEL, PLANT FUEL AND THEIR BLENDS

Summary. Physical and chemical properties of the fuel affect the pattern of fuel injection and combustion processes. The paper presents an influence of the fuel kind on the pattern of fast-changing quantities in the engine such as: pressure in the cylinder, fuel pressure in the injection pipe and the lift of the injector needle. Investigations of the self-ignition AD3.152 UR engine operated in external speed characteristics were performed on the testing bench. The tested engine ran on the fuels: Ekodiesel Ultra D diesel oil (DO), Rapeseed oil Fatty Acid Methyl Esters FAME and the blend of the two fuels, which had 20% (B20) and 30% (B30) ester content. On the basis of the determined pattern of fast-changing quantities, selected parameters of injection and combustion processes in the engine under consideration were calculated.

Key words: piston combustion engine, engine fuels, hydrocarbon fuels, plant fuels, fast-changing quantities in piston combustion engine.