

OCENA PORÓWNAWCZA
CHARAKTERYSTYK OBCIĄŻENIOWYCH SILNIKA
O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANEGO OLEJEM
NAPĘDOWYM, PALIWEM ROŚLINNYM I ICH MIESZANINĄ

Andrzej Ambrozik*, Dariusz Kurczyński**

* Instytut Modelowania Procesów, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

** Zakład Silników Spalinowych i Maszyn Roboczych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań hamownianych silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR zasilanego olejem napędowym Ekodiesel Ultra D, estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i ich mieszaniną o zawartości 20% estrów. Na podstawie przeprowadzonych badań sporządzono charakterystyki obciążeniowe badanego silnika. Na charakterystykach obciążeniowych, oprócz godzinowego i jednostkowego zużycia paliwa, pokazano emisje wybranych składników spalin i zadymienie spalin przy zasilaniu silnika wymienionymi paliwami.

Słowa kluczowe: tłokowy silnik spalinowy, paliwa węglowodorowe, paliwa roślinne, charakterystyki obciążeniowe

WSTĘP

Tłokowe silniki spalinowe mają już za sobą ponad 140-letnią historię rozwoju. Stanowią one konstrukcje o wysokim stopniu doskonałości. Są najbardziej rozpowszechnionym i podstawowym źródłem napędu pojazdów samochodowych i ciągników. Ponadto wykorzystywane są do napędu maszyn roboczych, lokomotyw, agregatów prądotwórczych i statków. Pomimo tak długiego okresu rozwoju i stosowania, nadal stanowią konstrukcję o dużych możliwościach rozwojowych, wymagającą dalszych intensywnych badań i analiz. Dotychczasowy okres rozwoju tłokowych silników spalinowych podzielić można na trzy etapy:

- doskonalenie konstrukcji, mające na celu poprawę wskaźników pracy silnika, wzrost trwałości i niezawodności,
- dążenie do zmniejszenia zużycia paliwa,
- ograniczanie szkodliwego oddziaływania silnika na naturalne środowisko człowieka.

Wymienione etapy wynikają bezpośrednio z wymagań, jakie były i są obecnie stawiane tłokowym silnikom spalinowym. W pierwszym etapie rozwoju silników, aby mogły być one powszechnie stosowane do napędu samochodów, konstrukcja ich musiała być doskonała w aspekcie wzrostu ich mocy, trwałości i niezawodności działania oraz łatwości obsługi. Na tym etapie nie zwracano uwagi na wielkość zużycia paliwa oraz na ich szkodliwe oddziaływanie na środowisko. Kryzys lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku wymusił rozwój silnika ukierunkowany na zmniejszenie zużycia paliwa. Stał się on również impulsem do poszukiwania paliw alternatywnych w stosunku do paliw węglowodorowych pochodzenia naftowego, tj. benzyny i oleju napędowego. Trzeci etap charakteryzuje zwrócenie uwagi na szkodliwe oddziaływanie silnika na środowisko naturalne. Wprowadzane są kolejne, coraz bardziej rygorystyczne normy określające dopuszczalny poziom emisji toksycznych składników spalin emitowanych przez silnik, negatywnie oddziałujących na otoczenie. Wymusiło to intensyfikację prac nad doskonaleniem konstrukcji silnika i jego układów, ukierunkowanych na ograniczanie szkodliwego oddziaływania silnika na środowisko. Obecnie istnieje również konieczność ograniczania emisji dwutlenku węgla, który w dużym stopniu przyczynia się do występowania i pogłębiania efektu cieplarnianego. W przypadku tłokowych silników spalinowych zasilanych paliwami węglowodorowymi zachodzi więc potrzeba ograniczania zużycia paliwa przez silnik i stosowania do jego zasilania paliw alternatywnych.

Obecnie głównym czynnikiem stymulującym rozwój tłokowych silników spalinowych i decydującym o jego powodzeniu jest niska uciążliwość dla środowiska naturalnego, tzn. możliwie najmniejsza emisja toksycznych składników spalin i małe zużycie paliwa oraz niska hałaśliwość pracy [Merkisz 2000, Merkisz i Kozak 2000, Zabłocki 2004]. Doskonalenie pracy silnika należy realizować przy zachowaniu lub poprawie jego wskaźników efektywnych.

Ważnym obszarem badań tłokowych silników spalinowych, mających wpływ na spełnienie ekologicznych wymagań stawianych silnikom, są paliwa. Obecne badania w dziedzinie paliw silnikowych obejmują dwa kierunki. Pierwszy z nich dotyczy paliw węglowodorowych, powszechnie stosowanych do zasilania silników. Obejmuje on modyfikację składu paliw, której efektem powinno być bardziej ekonomiczne i efektywne spalanie. Kierunek ten dotyczy rozwoju paliw na drodze opracowywania i stosowania coraz bardziej skomplikowanych technologii przetwarzania ropy naftowej oraz stosowania różnych dodatków pozwalających na uzyskiwanie wymaganych, bardziej korzystnych właściwości paliw. W Polsce produkcja paliw ukierunkowana na poprawę ich właściwości ekologicznych nastąpiła w latach dziewięćdziesiątych XX wieku. Rozpoczęto wówczas produkcję olejów napędowych o podwyższonych właściwościach ekologicznych, typu Ekodiesel i ONM Standard [Bedyk 1994 i 1995]. Drugi kierunek rozwoju paliw silnikowych to poszukiwanie paliw alternatywnych, które stopniowo mogłyby zastępować paliwa konwencjonalne. Najkorzystniejszym rozwiązaniem byłoby stosowanie paliw alternatywnych, niewymagających zmian konstrukcyjnych we współczesnych silnikach. Z powodzeniem stosuje się obecnie do silników o zapłonie wymuszonym paliwa gazowe LPG oraz dąży się do zwiększenia zastosowania gazu ziemnego. Zastosowanie gazu ziemnego do zasilania silników o zapłonie samoczynnym wymaga znacznych zmian konstrukcyjnych. W krótkoterminowej perspektywie paliwem, które można zastosować do zasilania silników o zapłonie samoczynnym są estry kwasów tłuszczowych olejów roślinnych. Podstawową zaletą paliw roślinnych jest to, że są to paliwa odnawialne, ulegają biodegradacji oraz pozwalają na ograniczenie emisji CO₂ do atmosfery. W warunkach europejskich, w szczególności polskich, są to estry metylowe kwa-

sów tłuszczowych oleju rzepakowego. Można je stosować w czystej postaci lub w mieszaninach z paliwem węglowodorowym. Powszechne zastosowanie estrów do zasilania współczesnych silników spalinowych wymaga jednak dalszych badań silnikowych i eksploatacyjnych w zakresie ustalenia zmian wskaźników pracy silnika, zużycia jego elementów, trwałości i niezawodności pracy, określenia optymalnych parametrów regulacyjnych silnika itp. Warunkiem powszechnego zastosowania estrów jako paliwa silnikowego jest opracowanie i wdrożenie odpowiedniego systemu transportu i przechowywania oraz kontroli właściwości tego paliwa. Pozwoli to na zapewnienie wymaganej jakości estrów, niezbędnej do prawidłowej i długotrwałej pracy silnika.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu rodzaju stosowanego paliwa do zasilania silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR na przebieg charakterystyk obciążeniowych tego silnika. Badania silnika przeprowadzono na hamowni silnikowej. Podczas badań stosowano dwa paliwa podstawowe: olej napędowy Ekodiesel Ultra D i estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME oraz mieszaniny tych paliw. Przeprowadzone badania umożliwiły wyznaczenie charakterystyk obciążeniowych silnika AD3.152 UR przy zasilaniu go wybranymi paliwami. Wyznaczono charakterystyki obciążeniowe silnika dla dwóch prędkości obrotowych wału korbowego, tj. prędkości w przybliżeniu odpowiadającej maksymalnemu momentowi obrotowemu i prędkości mocy nominalnej. Podczas badań silnika w poszczególnych warunkach jego pracy dokonywano pomiarów wybranych składników i zadymienia spalin. Poziom emisji tlenków azotu NO_x mierzono za pomocą analizatora EXSA-240-CL firmy Horiba, działającego na zasadzie detekcji chemiluminescencyjnej. Analizator ten umożliwia również określanie zawartości tlenu w spalinach. Zawartość tlenku węgla CO, dwutlenku węgla (CO_2), węglowodorów (HC) i tlenu (O_2) określano za pomocą wielogazowego analizatora spalin DiGas 465 firmy AVL. Zadymienie spalin mierzono pełnoprzepływowym dymomierzem M-490 firmy Tecnotest, w którym wykorzystuje się metodę optyczną.

OBIEKT I METODYKA BADAŃ

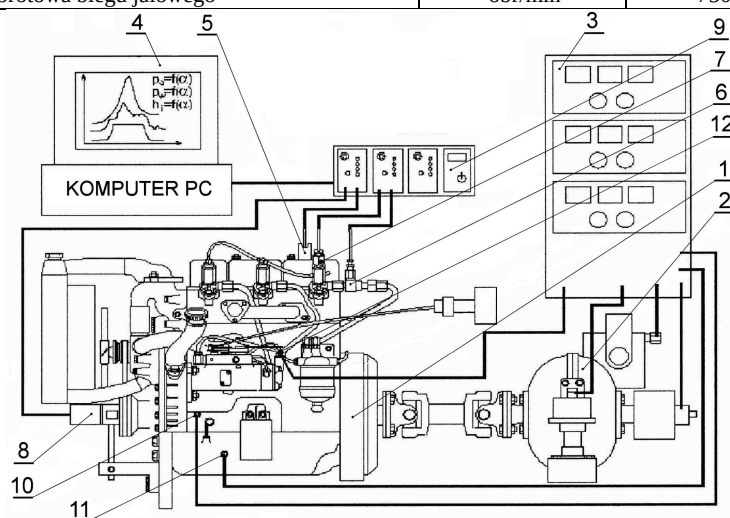
Obiektem badań w prezentowanej pracy był trzycylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR, z bezpośrednim wtryskiem paliwa do komory spalania, usytuowanej w denku tłoka. Wyposażony jest on w układ zasilania z rozdzielaczową pompą wtryskową typu DPA, napędzaną od wału korbowego poprzez przekładnię zębatą. Wtryskiwacze paliwa silnika AD3.152 UR wyposażone są w rozpylacze czterootworowe. Charakterystyczne parametry i dane techniczne badanego silnika przedstawiono w tabeli 1.

Badania przeprowadzono na stanowisku hamownianym, w skład którego wchodził badany silnik AD3.152 UR, hamulec wodny i szafa kontrolno-pomiarowa służąca do sterowania stanowiskiem i pozwalająca na odczyt wskaźników pracy silnika i hamulca. Stanowisko wyposażone było w system do indykowania ciśnienia w cylindrze silnika. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 1.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne badanego silnika

Table 1. Basic technical data of the engine

Silnik o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR		
Parametr	Jednostka	Wartość
Układ cylindrów	-	rzędowy
Liczba cylindrów	-	3
Rodzaj wtrysku	-	bezpośredni
Kolejność pracy cylindrów	-	1 – 2 – 3
Stopień sprężania	-	16,5
Średnica cylindra	mm	91,44
Skok tłoka	mm	127
Pojemność skokowa silnika	dm ³	2,502
Długość korbowodu	mm	223,80÷223,85
Maksymalna moc silnika	kW	34,6
Prędkość obrotowa mocy maksymalnej	obr/min	2250
Maksymalny moment obrotowy silnika	Nm	168,7
Prędkość obrotowa maksymalnego momentu	obr/min	1350
Statyczny kąt wyprzedzenia wtrysku	°OWK	17
Kąt otwarcia zaworu dolotowego	°OWK	13
Kąt zamknięcia zaworu dolotowego	°OWK	43
Kąt otwarcia zaworu wylotowego	°OWK	46
Kąt zamknięcia zaworu wylotowego	°OWK	10
Prędkość obrotowa biegu jałowego	obr/min	750±50



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – badany silnik AD3.152UR, 2 – hamulec wodny, 3 – blok kontrolno-pomiarowy, 4 – komputer PC, 5 – piezokwarcowy czujnik ciśnienia w komorze spalania, 6 – piezokwarcowy czujnik ciśnienia paliwa w przewodzie wtryskowym, 7 – transformatorowy czujnik przemieszczeń, 8 – nadajnik kąta obrotu wału korbowego, 9 – zestaw wzmacniaczy sygnałów przekazywanych z czujników, 10 – czujnik temperatury cieczy chłodzącej silnik, 11 – czujnik temperatury oleju, 12 – czujnik temperatury paliwa

Fig. 1. Diagram of the test stand: 1 – AD3.152UR engine, 2 – water brake, 3 – checking and measurement block, 4 – PC computer, 5 – quartz pressure sensor in the combustion chamber, 6 – quartz pressure sensor in the injection pipe, 7 – transformer displacement sensor, 8 – crankshaft rotation angle transmitter, 9 – set of sensor signal amplifiers, 10 – engine coolant temperature sensor, 11 – engine oil temperature sensor, 12 – fuel temperature sensor

PALIWA STOSOWANE DO ZASILANIA SILNIKA PODCZAS BADAŃ

W czasie badań eksperymentalnych silnik zasilano dwoma podstawowymi paliwami o odmiennym pochodzeniu: olejem napędowym Ekodiesel Ultra D i paliwem roślinnym 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. Zawartość siarki w tym paliwie jest mniejsza niż wymagania mające obowiązywać od 2009 roku w Unii Europejskiej. Ponadto charakteryzuje się on obniżoną temperaturą końca procesu destylacji, obniżoną zawartością węglowodorów aromatycznych, małą zawartością zanieczyszczeń stałych, podwyższoną liczbą cetanową. Drugim paliwem wykorzystanym w badaniach było paliwo roślinne FAME, będące mieszaniną estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego, produkowane w Rafinerii Trzebinia. Jest to paliwo uzyskiwane w procesie transestryfikacji triglicerydów oleju rzepakowego metanolem. W wyniku reakcji transestryfikacji uzyskuje się mieszaninę estrów metylowych kwasów tłuszczowych oraz frakcję glicerynową [Szlachta 2002, Bocheński 2003]. Wykorzystane do badań paliwo roślinne ma podobną jak olej napędowy Ekodiesel Ultra D liczbę cetanową, większą gęstość, mniejszą wartość opałową, większą temperaturę mętnienia i zablokowania zimnego filtra. Jego wykorzystanie w warunkach zimowych jest możliwe po zastosowaniu odpowiednich dodatków. Paliwo roślinne FAME zawiera więcej tlenu, co korzystnie wpływa na proces spalania. Ponadto charakteryzuje się dobrymi własnościami smarnymi. Wysoka temperatura zapłonu estrów zapewnia bezpieczeństwo podczas stosowania tego paliwa. Podstawowe własności fizykochemiczne badanych paliw przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe właściwości fizykochemiczne paliw silnikowych wykorzystanych w badaniach [Spraw. z badań 5120402, Świad. Jakości BM-101/209a/2005]

Table 2. Basic physical and chemical properties of engine fuels used in investigations

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%-owej pozostałości destylacyjnej, % (m/m)	0,01	0,28
Badania działania korodującego na płytkach miedzi, klasa	1	1

Oprócz dwóch podstawowych paliw wykorzystanych w badaniach, zastosowano również następującą mieszaninę tych paliw: 20% estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME + 80% oleju napędowego Ekodiesel Ultra D, którą oznaczono E20.

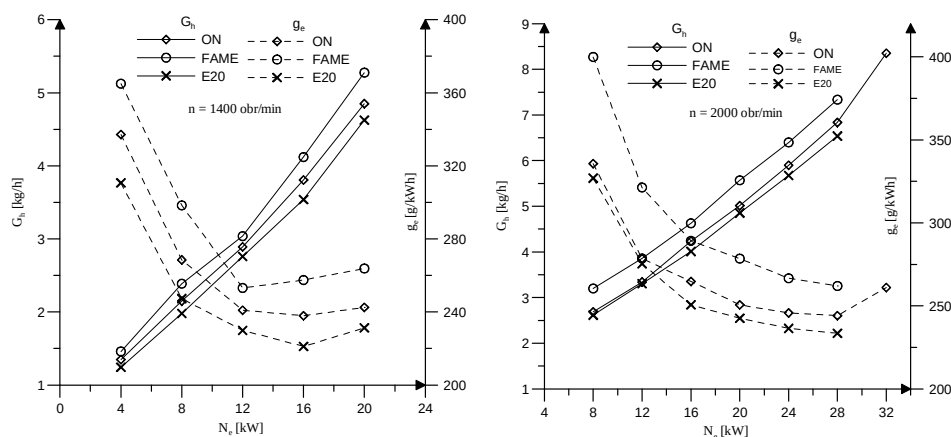
WYNIKI BADAŃ

Wyniki hamownianych badań silnika AD3.152 UR, których celem było wyznaczenie charakterystyk obciążeniowych przy zasilaniu go różnymi paliwami ilustrują rysunki.

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki obciążeniowe badanego silnika wyznaczone dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min.

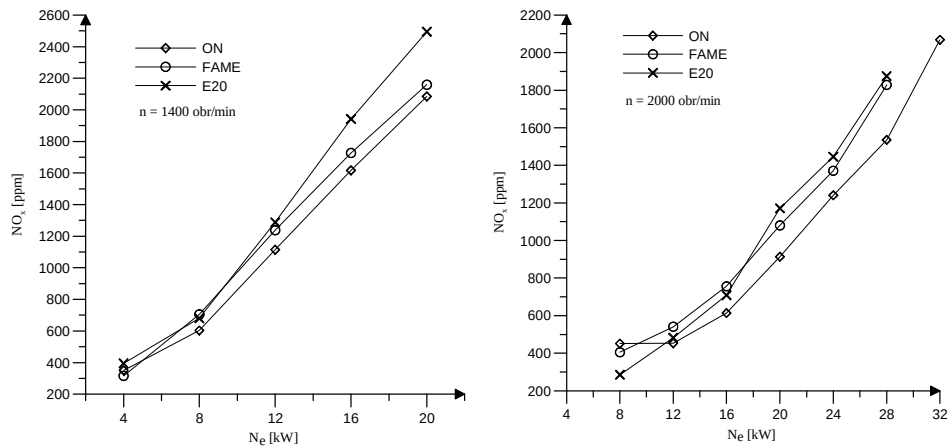
Emisję tlenków azotu (NO_x), niespalonych węglowodorów (HC), tlenku węgla (CO) i dwutlenku węgla (CO_2) podczas wyznaczania charakterystyk obciążeniowych silnika AD3.152 UR przy zasilaniu go różnymi paliwami przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3, 4 i 5.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów zadymienia spalin badanego silnika zmierzonych w opisanych warunkach.



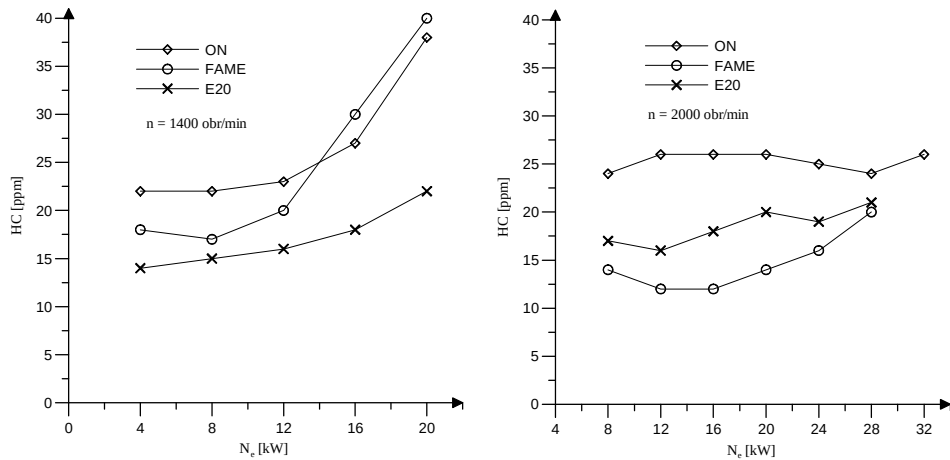
Rys. 2. Charakterystyki obciążeniowe przedstawiające godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa silnika AD3.152 UR, sporządzone dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min, przy zasilaniu go różnymi paliwami

Fig. 2. Load characteristics showing hour and unit fuel consumption in AD3.152 UR engine fuelled with different oils, determined for the rotational speed 1400 and 2000 RPM



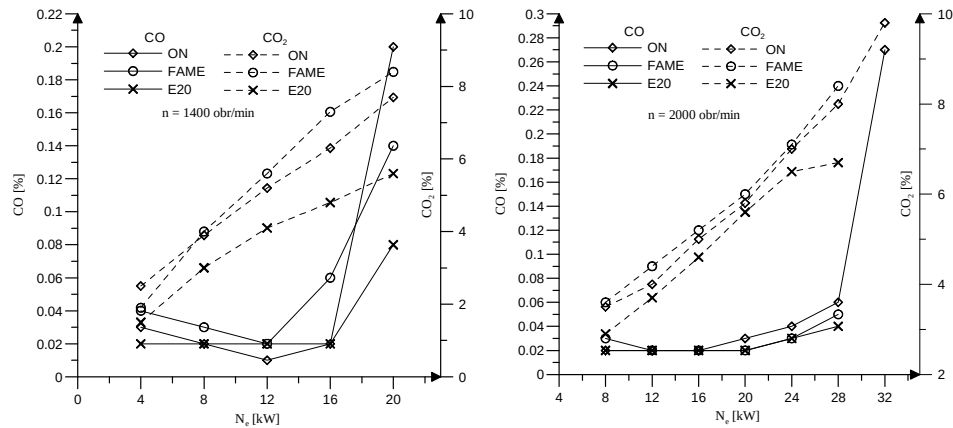
Rys. 3. Emisja tlenków azotu (NO_x) ze spalinami silnika AD3.152 UR przy sporządzaniu charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min i zasilaniu go różnymi paliwami

Fig. 3. Nitric oxides (NO_x) exhaust emission in AD3.152 UR engine fuelled with different oils for load characteristics determined at the rotational speed 1400 and 2000 RPM



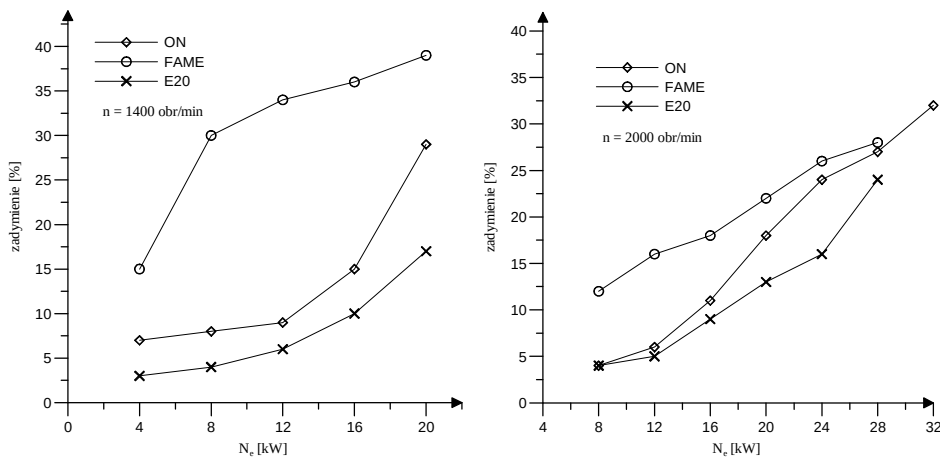
Rys. 4. Emisja węglowodorów (HC) ze spalinami silnika AD3.152 UR przy sporządzaniu charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min i zasilaniu go różnymi paliwami

Fig. 4. Hydrocarbon (HC) exhaust emission in AD3.152 UR engine fuelled with different oils for load characteristics determined at the rotational speed 1400 and 2000 RPM



Rys. 5. Emisja tlenku węgla (CO) i dwutlenku węgla (CO₂) ze spalinami silnika AD3.152 UR przy sporządzaniu charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min i zasilaniu go różnymi paliwami

Fig. 5. Carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂) emission in AD3.152 UR engine fuelled with different oils for load characteristics determined at the rotational speed 1400 and 2000 RPM



Rys. 6. Zadymienie spalin silnika AD3.152 UR przy sporządzaniu charakterystyk obciążeniowych dla prędkości obrotowych 1400 i 2000 obr/min i zasilaniu go różnymi paliwami

Fig. 6. Exhaust gases smoke in AD3.152 UR engine fuelled with different oils for load characteristics determined at the rotational speed 1400 and 2000 RPM

WNIOSKI

W artykule przedstawiono wyniki hamownianych badań silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 UR, które polegały na wyznaczeniu charakterystyk obciążeniowych przy zasilaniu go olejem napędowym Ekodiesel Ultra D, estrami metylowymi kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego FAME i mieszaniną tych paliw o zawartości 20% estrów (E20). Na podstawie uzyskanych wyników można sformułować następujące wnioski:

1. Sporządzone charakterystyki obciążeniowe silnika AD3.152 UR dla prędkości 1400 i 2000 obr./min wskazują na większe godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa przy zasilaniu go estrami metylowymi oleju rzepakowego. Dla mieszaniny zawierającej 20% estrów (E20) uzyskano nieznacznie mniejsze godzinowe i jednostkowe zużycie paliwa w porównaniu z olejem napędowym.
2. Emisja tlenków azotu zmierzona w funkcji obciążenia silnika była większa przy zasilaniu silnika estrami w porównaniu z jego zasilaniem olejem napędowym. Dla paliwa E20, przy pracy silnika w zakresie większych obciążeń, otrzymano większe emisje tlenków azotu niż dla oleju napędowego i FAME.
3. Mniejszą emisję niespalonych węglowodorów HC otrzymano przy zasilaniu silnika estrami metylowymi oleju rzepakowego FAME i paliwem E20 zawierającym 20% estrów. Ze wzrostem obciążenia następował wzrost emisji HC przy zasilaniu silnika poszczególnymi paliwami. Przy zasilaniu silnika paliwem FAME i jego pracy wg charakterystyki obciążeniowej przy prędkości obrotowej 1400 obr/min, dla większych obciążeń otrzymano większą emisję HC niż dla oleju napędowego.
4. Zasilając silnik AD3.152 UR estrami metylowymi oleju rzepakowego FAME uzyskano większą emisję dwutlenku węgla (CO_2) niż przy zasilaniu go olejem napędowym i paliwem E20. Przy zasilaniu silnika paliwem E20 emisja CO_2 była najmniejsza.
5. Największe zadymienie spalin otrzymano przy zasilaniu silnika estrami. Jednocześnie dla oleju napędowego zawierającego 20% estrów (E20) zmierzone zadymienie spalin w poszczególnych punktach pomiarowych było najmniejsze.
6. Na podstawie analizy otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że przy zasilaniu silnika AD3.152 UR olejem napędowym z dodatkiem estrów metylowych oleju rzepakowego FAME, obok wysokiej emisji tlenków azotu (NO_x), otrzymano korzystne wskaźniki pracy silnika.

PIŚMIENNICTWO

- Ambrozik A., Orliński P., Orliński S., 2004: Wpływ zasilania paliwem węglowodorowym ONM City 50 i roślinnym RosBioDiesel „RBD” na charakterystyki wydzielania ciepła podczas procesu spalania. *AUTOBUSY Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, 1-2, 58–60.
- Bedyk I., 1994: Olej napędowy lekki EKODIESEL. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji 11, 21–23.
- Bedyk I., 1995: Olej napędowy miejski ONM „Standard”. Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji 17, 4–5.
- Bocheński C. I., 2003: Biodiesel paliwa rolnicze. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Merkisz J., 2000: Silniki tłokowe. Problemy spalania w silnikach spalinowych. Ekspertyza. Wydawnictwo Polskiego Instytutu Spalania, Warszawa, 11–61.

- Merkisz J., Kozak M., 2000: Paliwa do współczesnych silników spalinowych (cz.1, cz. 2). Paliwa, Oleje i Smary w Eksploatacji, 72, 5–11; 73, 4–8.
- Sprawozdanie z badań 5120402 wyrobu BIODIESELA 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.
- Zabłocki M., 2004: Tłokowe silniki spalinowe jako atrakcyjny obiekt studiów i badań. Czasopismo Techniczne Mechanika z. 6-M/2004, KONMOT-AUTOPROGRES 2004 Silniki Spalinowe T. 1, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków-Zakopane, 33–50.

COMPARATIVE EVALUATION OF LOAD CHARACTERISTICS OF SELF-IGNITION ENGINE FUELLED BY DIESEL OIL, VEGETABLE OIL AND THEIR BLEND

Summary. The paper presents selected results of test stand investigations into AD3.152 UR self-ignition internal combustion engine fuelled with Ekodiesel Ultra D, Fatty Acid Methyl Esters FAME of Rapeseed oil and their blend, the ester content of which is 20%. Load characteristics of the engine were determined on the basis of investigations. In addition to hour and unit fuel consumption, the load characteristics also show the emission of selected exhaust gases components and exhaust gases smoke when the engine is fuelled by the above-mentioned oils.

Key words: piston internal combustion engine, hydrocarbon fuels, biofuels, load characteristics

Recenzent: prof. dr hab. Eugeniusz Krasowski