

PORÓWNANIE WŁASNOŚCI UŻYTKOWYCH I EKOLOGICZNYCH SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANEGO OLEJEM NAPĘDOWYM I BIOESTREM

Grzegorz Koszałka, Jacek Hunicz, Paweł Kordos

Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: g.koszalka@pollub.pl

Streszczenie. W artykule porównano parametry użytkowe, zadymienie spalin i stężenia składników toksycznych w spalinach wysokoprężnego silnika zasilanego klasycznym olejem napędowym, dostępnym na stacjach paliw bioestrem oraz ich mieszaniną. Pomiary przeprowadzono na silniku starszej generacji z rzędową pompą wtryskową pracującym w warunkach charakterystyki prędkościowej pełnej mocy. Stężenia 23 związków chemicznych w spalinach zmierzono z wykorzystaniem systemu SESAM FTIR firmy AVL.

Słowa kluczowe: paliwa alternatywne, bioester, silnik wysokoprężny, emisja spalin, zadymienie spalin.

WPROWADZENIE

Badania paliw alternatywnych opartych na biokomponentach do zasilania silników o zapłonie samoczynnym w głównej mierze skupiają się na określeniu ich wpływu na środowisko naturalne. Ponadto analizowane są czynniki ekonomiczne oraz wpływ ich stosowania na osiągi i trwałość silników [1, 2, 3, 9, 10, 11]. Na podstawie literatury można stwierdzić, że stosowanie biopaliw do zasilania silników diesla obniża ich osiągi, jednak pozwala na zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin, z wyłączeniem tlenków azotu [4, 5, 6, 8].

W związku z pojawieniem się na stacjach paliw w Polsce paliwa typu biodiesel, postanowiono porównać parametry użytkowe i ekologiczne silnika zasilanego tym paliwem i klasycznym olejem napędowym. Porównania dokonano wykorzystując starszej generacji silnik wysokoprężny, gdyż właściciele pojazdów z takimi silnikami często eksploatują je na tańszym w zakupie paliwie typu biodiesel.

OBIEKT I METODA BADAŃ

Badania przeprowadzono na czterocylindrowym, niedoładowanym silniku wysokoprężnym o objętości skokowej $2,4 \text{ dm}^3$ i mocy znamionowej 51,5 kW osiąganey przy 4200 obr/min. Silnik ten, o pośrednim wtrysku paliwa, wyposażony był w rzędową pompę paliwa. Wykorzystany silnik był w znacznym stopniu wyeksploatowany. Przed badaniami nie przeprowadzono regulacji

pompy wtryskowej. Wybór takiego obiektu, tj. silnika starszej generacji o znacznym przebiegu, podyktowany był tym, że użytkownicy takich silników często stosują tańsze w zakupie paliwo, jakim jest bioester.

W badaniach porównano parametry użytkowe, zadymienie i stężenia składników toksycznych w spalinach silnika zasilanego: olejem napędowym (ON 100%), bioestrem (B 100%) oraz mieszaniną powyższych paliw o stosunku masowym 50% do 50%. Wykorzystane w badaniach paliwa dostępne były w handlu i pochodziły z jednego koncernu paliwowego. Wybrane parametry badanych paliw zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wybrane parametry badanych paliw (na podstawie świadectw jakości)

Tab. 1. Chosen parameters of the investigated fuels (on the base of quality reports)

Lp.	Oznaczenie wielkości	Jednostka	Paliwo	
			ON Ekodiesel Ultra F4,8	Bioester B 100 (F)
1	Gęstość w temp 15°C	kg/m ³	838,8	883
2	Lepkość kinematyczna w 40°C	mm ² /s	2,736	4,47
3	Liczba cetanowa		51,6	51
4	Temperatura zapłonu	°C	65	130
5	Pozostałość po koksowaniu z 10% pozost. dest.	%	0,013	0,13
6	Zawartość siarki	mg/kg	6,32	4,7
7	Zawartość wody	mg/kg	75,8	117
8	Całkowita zawartość zanieczyszczeń	mg/kg	11,1	17
9	Działanie korodujące na płytach Cu (3h w temp. 50°C)	–	klasa 1	klasa 1
10	Temperatura zablokowania zimnego filtra	°C	-32	-23
11	Zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych	% (m/m)		97,3

Pomiary wykonywano w warunkach charakterystyki prędkościowej pełnej mocy (dźwignia regulatora pompy wtryskowej w położeniu maksymalnego dawkowania).

Badania przeprowadzono na hamowni silnikowej. Do obciążania i pomiaru momentu obrotowego silnika służył hamulec wirowy Zollner Alpha 240. Zużycie paliwa mierzono wagą paliwową AVL Dynamic Fuel Balance. Zadymienie spalin mierzono absorpcyjnym dymomierzem AVL Smoke Meter 437.

Pomiar składu spalin odbywał się z wykorzystaniem systemu analitycznego SESAM FTIR (Fourier Transform Infrared) produkcji firmy AVL. Urządzenie oparte jest na interferometrze skanującym Michelsona. Widmo pochłanianego przez próbkę spalin promieniowania podczerwonego rejestrowane jest w zakresie liczby falowej od 700 do 4000 cm⁻¹ z rozdzielczością optyczną 0,5 cm⁻¹. Jednocześnie może być oznaczane stężenie molowe do 25 składników spalin. W zakresie pomiarów zawartości węglowodorów oraz tlenków azotu oznaczane są stężenia poszczególnych związków chemicznych.

Spaliny dostarczane były do komory pomiarowej interferometru za pomocą systemu grzanych dróg oraz grzanego 4-wejściowego przełącznika miejsc pomiarowych wyposażonego w ceramiczny filtr zanieczyszczeń stałych. Układ poboru i transportu spalin pracował w stałej temperaturze 185 °C. Rejestrowane widmo było odnoszone do widma tła pochodzącego od osuszonego i pozbawionego dwutlenku węgla powietrza przepływającego przez układ poboru spalin. Dzięki temu wyeliminowano wpływ substancji odkładających się w filtrze i układzie poboru spalin na wyniki pomiarów. System analityczny charakteryzuje się szybkością odpowiedzi na poziomie

1 sekundy. W praktyce podczas badań, uwzględniając czas transportu spalin, czas odpowiedzi wynosił około 3 sekund.

W trakcie badań oznaczano stężenia molowe składników spalin wyszczególnionych w Tab. 2. Natomiast stężenie molowe węglowodorów (odniesione do liczby atomów węgla) obliczono jako sumę ważoną wszystkich oznaczanych węglowodorów z równania:

$$\tilde{x}_{\text{HC}} = \tilde{x}_{\text{CH}_4} + 2\tilde{x}_{\text{C}_2\text{H}_2} + 2\tilde{x}_{\text{C}_2\text{H}_4} + 10\tilde{x}_{\text{C}_8\text{H}_{18}} + 7,5\tilde{x}_{\text{C}_7\text{H}_8} + 3\tilde{x}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 2\tilde{x}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3\tilde{x}_{\text{C}_3\text{H}_6} + 4\tilde{x}_{\text{C}_4\text{H}_6},$$

gdzie: $\tilde{x}_i$ są udziałami molowymi poszczególnych składników spalin.

Tab. 2. Nazwy i symbole chemiczne analizowanych składników spalin

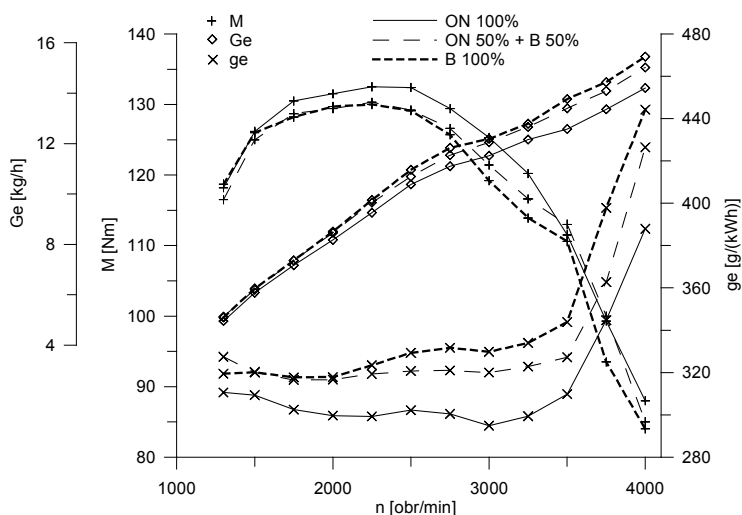
Tab. 2. Names and chemical symbols of analyzed exhaust compounds

Lp.	Nazwa związku chemicznego	Symbol chemiczny
1.	Tlenek azotu	NO
2.	Dwutlenek azotu	NO ₂
3.	Podtlenek azotu	N ₂ O
4.	Tlenek węgla	CO
5.	Dwutlenek węgla	CO ₂
6.	Metan	CH ₄
7.	Acetylen	C ₂ H ₂
8.	Etylen	C ₂ H ₄
9.	Etan	C ₂ H ₆
10.	Propylen	C ₃ H ₆
11.	Propan	C ₃ H ₈
12.	1,3 butadien	C ₄ H ₆
13.	N-oktan	C ₈ H ₁₈
14.	Węglowodory aromatyczne (toluen)	C ₇ H ₈
15.	Aldehyd mrówkowy	HCHO
16.	Aldehyd octowy	CH ₃ CHO
17.	Kwas mrówkowy	HCOOH
18.	Kwas izocyjanowy	HNCO
19.	Woda	H ₂ O
20.	Amoniak	NH ₃
21.	Cyjanowodor	HCN
22.	Dwutlenek siarki	SO ₂
23.	Siarczek karbonylu	COS

WYNIKI BADAŃ

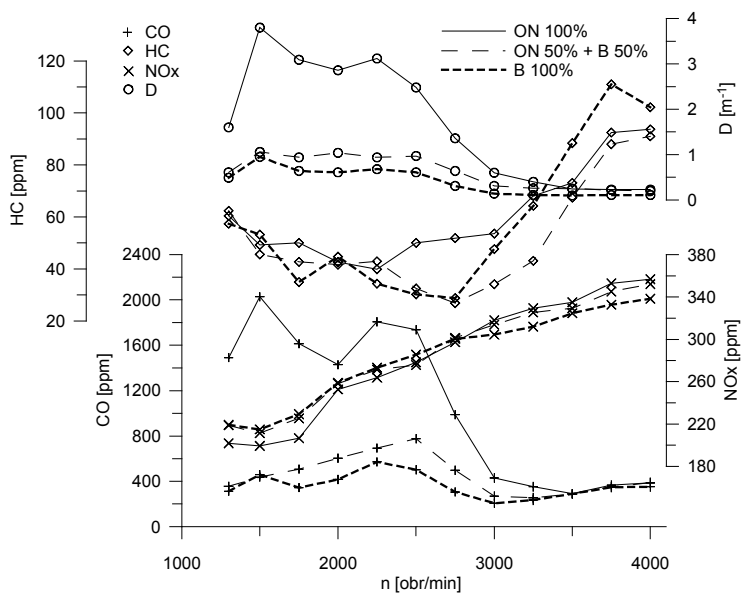
Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki prędkościowe silnika zasilanego badanymi paliwami. Godzinowe zużycie bioestru jest średnio o 6% większe od zużycia oleju napędowego, co wynika z większej o 5% gęstości tego paliwa. Procentowe różnice wzrastają wraz z prędkością obrotową (od 3% przy małej do 9% przy dużej prędkości obrotowej), co związane jest z charakterystyką pompy wtryskowej i większą lepkością bioestru.

Pomimo większej masy wtryskiwanego paliwa, osiągany na bioestrze moment obrotowy jest mniejszy, średnio o 3%. Konsekwencją takiego przebiegu powyższych charakterystyk są znacznie większe wartości jednostkowego zużycia paliwa przy zasilaniu silnika bioestrem (średnio o 9%).



Rys. 1. Charakterystyki zewnętrzne silnika zasilanego badanymi paliwami

Fig. 1. Performance and fuel consumption full load speed characteristic of the engine fuelled with the investigated fuels



Rys. 2. Zadymienie spalin (D) oraz stężenia: tlenku węgla (CO), węglowodorów (HC) i tlenków azotu (NO_x) w spalinach silnika zasilanego badanymi paliwami

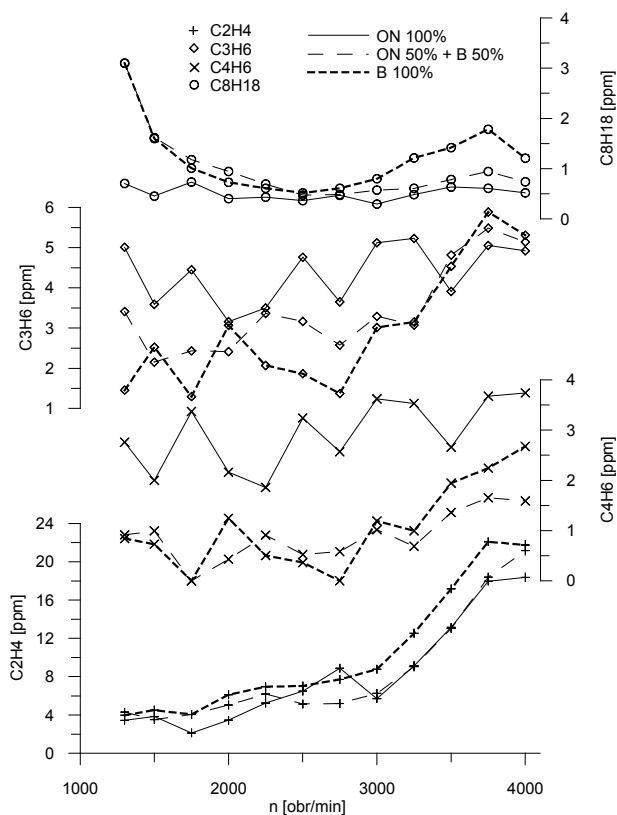
Fig. 2. Smoke emission (D) and concentrations of: carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC) and nitrogen oxides (NO_x) in exhaust gas of the engine fuelled with the investigated fuels

Zasilanie silnika bioestrem bardzo korzystnie wpłynęło na zadymienie spalin, które w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych wału korbowego silnika było średnio ponad trzykrotnie mniejsze, a w zakresie dużych prędkości obrotowych mniejsze o kilkadziesiąt procent, w porównaniu do zadymienia spalin silnika zasilanego olejem napędowym (rys. 2).

Zastosowanie bioestru korzystnie wpłynęło również na stężenia tlenu węgla w spalinach, które w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych wału korbowego silnika były trzykrotnie mniejsze przy zasilaniu silnika bioestrem, niż olejem napędowym. W zakresie największych prędkości obrotowych stężenia CO były zbliżone dla wszystkich badanych paliw. (rys. 2).

Stwierdzono niejednoznaczny wpływ bioestru na stężenie tlenków azotu. W zakresie małych prędkości obrotowych silnika stężenia NO_x były o ok. 7%, a w zakresie średnich prędkości obrotowych o około 3% wyższe na bioestrze. Z kolei w zakresie dużych prędkości obrotowych stężenia NO_x były o ok. 5% niższe przy zasilaniu silnika bioestrem.

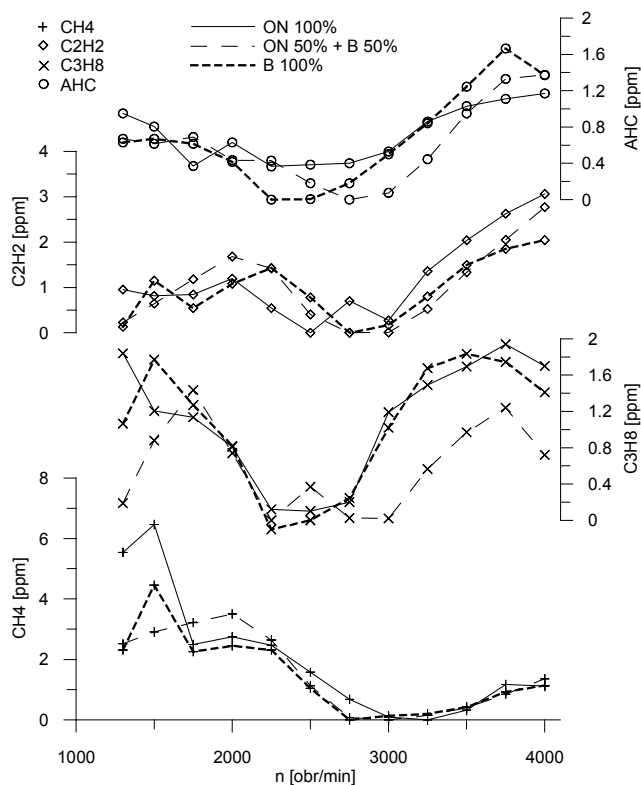
Zasilanie silnika bioestrem korzystnie wpłynęło również na stężenia węglowodorów w spalinach, w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych silnika (spadek średnio o kilkanaście procent), natomiast w zakresie dużych prędkości obrotowych stężenia HC były o kilkanaście procent wyższe przy zasilaniu silnika bioestrem. Najmniejsze stężenia HC uzyskano dla silnika zasilanego mieszaniną oleju napędowego i bioestru (rys. 2).



Rys. 3. Stężenia węglowodorów mających największe udziały w całkowitym stężeniu węglowodorów w spalinach silnika zasilanego badanymi paliwami

Fig. 3. Concentrations of particular hydrocarbons having the biggest contribution to THC

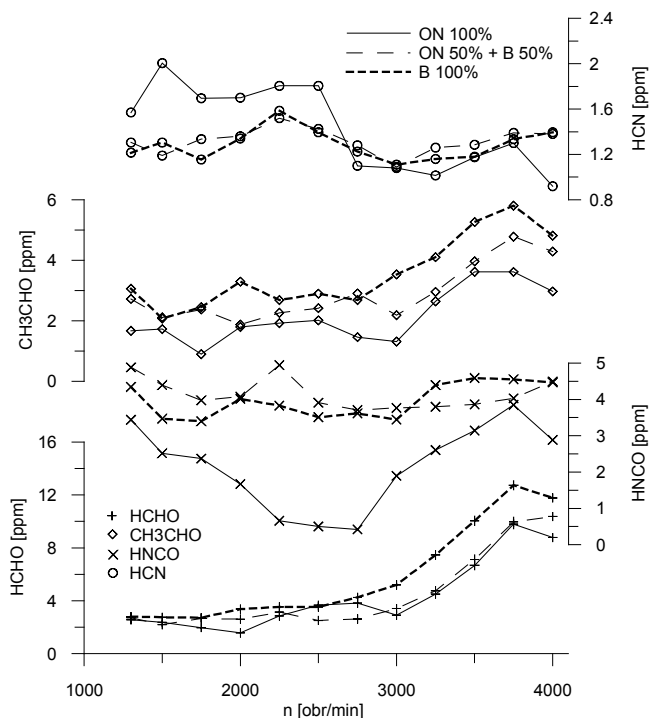
Analizując wpływ stosowanego paliwa na stężenia poszczególnych węglowodorów (rys. 3 i 4) można stwierdzić, że w spalinach silnika zasilanego bioestrem mniejsze były stężenia: 1,3-butadienu (C_4H_6), propylenu (C_3H_6), a także metanu (CH_4), natomiast większe: n-oktanu (C_8H_{18}) i etylenu (C_2H_4). Wyniki pomiarów nie pozwoliły stwierdzić, aby występowały różnice przy zasilaniu silnika olejem napędowym i biodiselem w stężeniach pozostałych węglowodorów, tj. acetylenu (C_2H_2), propanu (C_3H_8), węglowodorów aromatycznych (AHC) i etanu (C_2H_6 ; nie przedstawione na rysunku, małe wartości – poniżej 1,2 ppm).



Rys. 4. Stężenia pozostałych węglowodorów w spalinach silnika zasilanego badanymi paliwami

Fig. 4. Concentrations of the others hydrocarbons in exhaust gas of the engine fuelled with the investigated fuels

Stężenia kwasu izocyjanowego ($HNCO$), aldehydu octowego (CH_3CHO) oraz formaldehydu ($HCHO$) w spalinach silnika zasilanego bioestrem były większe niż w spalinach silnika zasilanego olejem napędowym. Natomiast stężenia silnie toksycznego cyjanowodoru (HCN), w spalinach silnika zasilanego bioestrem były mniejsze w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych silnika, a w zakresie dużych prędkości obrotowych porównywalne lub nieznacznie większe (rys. 5).



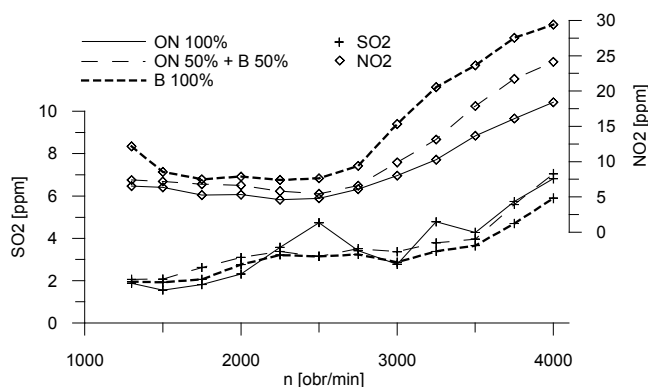
Rys. 5. Stężenia formaldehydu (HCHO), aldehydu octowego (CH_3CHO), kwasu izocyjanowego (HNCO) i cyjanowodoru (HCN) w spalinach silnika zasilanego badanymi paliwami

Fig. 5. Concentrations of formaldehyde (HCHO), acetaldehyde (CH_3CHO), isocyanic acid (HNCO) and hydrogen cyanide (HCN) in exhaust gas of the engine fuelled with the investigated fuels

Spaliny silnika zasilanego bioestrem zawierały o kilkadziesiąt procent więcej dwutlenku azotu oraz średnio o kilka procent mniej dwutlenku siarki w porównaniu do spalin silnika zasilanego olejem napędowym (rys. 6).

Stężenia, nieprzedstawionych na rysunkach, następujących związków: podtlenku azotu, kwasu mrówkowego, amoniaku i siarczku karbonylu nie przekraczały 1 ppm.

Przeprowadzone badania pokazały, że stężenia niektórych składników toksycznych w spalinach, mierzone na charakterystyce zewnętrznej, silnie zmieniają się wraz z prędkością obrotową silnika, oraz że w wielu przypadkach zmiany te nie są monotoniczne. Krzywe stężeń danego składnika spalin uzyskane dla różnych paliw w wielu przypadkach przecinają się, co utrudnia ocenę wpływu badanych paliw na ekologię silnika – w pewnych zakresach prędkości obrotowych silnika korzystniejsze jest jedno, a w innych inne paliwo. Należy podkreślić, że wyniki pomiarów charakteryzowały się dużą powtarzalnością. Wyjątek stanowiły tylko wyniki pomiarów 1,3-butadienu i propylenu, których wartości uzyskiwane w kolejnych pomiarach, dokonywanych w tych samych warunkach pracy silnika, różniły się między sobą znacząco.



Rys. 6. Stężenia dwutlenku siarki (SO_2) i dwutlenku azotu (NO_2) w spalinach silnika zasilanego badanymi paliwami

Fig. 6. Concentrations of sulphur dioxide (SO_2) and nitrogen dioxide (NO_2) in exhaust gas of the engine fuelled with the investigated fuels

PODSUMOWANIE

Wyznaczono charakterystyki prędkościowe parametrów użytkowych i ekologicznych silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego mineralnym olejem napędowym, bioestrem oraz ich mieszaniną. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na sformułowanie następujących stwierdzeń:

1. Osiągi uzyskiwane na bioestrze były tylko nieznacznie mniejsze (ok. 3%), niż na oleju napędowym, co nie powinno być zauważalne podczas normalnego użytkowania silnika. Należy się jednak liczyć z kilkuprocentowym zwiększeniem zużycia paliwa.
2. Zadymienie spalin silnika zasilanego bioestrem było znacząco mniejsze, niż zasilanego klasycznym olejem napędowym.
3. Zastosowanie bioestru bardzo korzystnie wpłynęło na stężenie tlenku węgla w spalinach, zwłaszcza w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych silnika.
4. Mniej jednoznaczny jest skutek zastosowania bioestru w odniesieniu do emisji węglowodorów i tlenków azotu. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że w warunkach rzeczywistych badany silnik więcej czasu pracuje w zakresie małych i średnich prędkości obrotowych, niż dużych [7], można mówić o korzystnym wpływie zastosowania bioestru na emisję węglowodorów i niekorzystnym na emisję tlenków azotu.

Podsumowując można stwierdzić, że zastosowanie dostępnego w handlu bioestru B100 do zasilania starszej generacji silnika z rzędową pompą wtryskową praktycznie nie wpłynęło na osiągi silnika, a było korzystne z punktu widzenia emisji składników toksycznych.

LITERATURA

1. Ambrozik A., Kruczyński S., Orliński S.: Wpływ właściwości paliw naturalnych i roślinnych na wskaźniki ekonomiczne i energetyczne silnika o zapłonie samoczynnym. *Motrol* 2006, 8A, 13–20.
2. Dzieniszewski G.: Wybrane problemy stosowania biopaliw do zasilania silników z zapłonem samoczynnym. *Inżynieria Rolnicza* 10(108)/2008, 39–45.

3. Dzieniszewski G.: Analiza możliwości zasilania silnika diesla surowym olejem rzepakowym. *Inżynieria Rolnicza* 12/2006, s. 117-125.
4. Dzieniszewski G., Piekarski W.: Wybrane problemy zasilania silników Diesla nisko przetworzonym olejem rzepakowym. *Eksploatacja i Niezawodność* Nr 3/2006, s. 58-65.
5. Karczewski M., Wilk M.: Problemy zasilania silnika G9T paliwem G34 oraz jego mieszaninami z biokomponentem, *Czasopismo Techniczne Zeszyt 7-M/2008*, s. 47-54.
6. Merkisz J., Kozak M.: Wpływ składu mieszanek biopaliw z paliwami konwencjonalnymi na emisję toksycznych składników spalin. *Eksploatacja i Niezawodność* Nr 3/2003, s. 12-18.
7. Niewczas A., Kordos P., Koszałka G.: Laboratory method of reliability research of a diesel automotive engine. *Transport and Telecommunication* Vol. 7, No 2, 2006, pp. 312-317.
8. Piekarski W., Zając G.: Analiza doboru mieszanek paliwowych biopaliwa i oleju napędowego w aspekcie emisji spalin. *Eksploatacja i Niezawodność* Nr 3/2003, s. 6-11.
9. Struś M.: Efektywność zastosowania biopaliw i biokomponentów do silników spalinowych. *Journal of KONES Internal Combustion Engines* 2005, Vol. 12, No. 3-4, s. 289-297.
10. Uzdowski M.: Możliwości wykorzystania mieszanin paliw tradycyjnych i alternatywnych do zasilania silników ZS. *Motrol* 2006, 8A, s. 280-285.
11. Witkowski K.: Wpływ zasilania okrętowych silników wysokoprężnych mieszaninami oleju napędowego i estrów oleju rzepakowego na parametry pracy silnika i skład spalin. *Journal of KONES Powertrain and Transport* Vol. 13, 2006, No. 4, s. 421-428.

COMPARISON OF PERFORMANCE AND ECOLOGICAL PARAMETERS OF COMPRESSION-IGNITION ENGINE FUELLED WITH DIESEL AND BIOESTER

Summary. Operational parameters, smoke emission and toxic components content in exhaust gases of a compression-ignition engine fuelled with fossil diesel, commercial bio-diesel (fatty acid methyl ester) and their blend were compared in the paper. Research was carried out on an older generation diesel engine equipped with an in-line injection pump. Measurements were conducted on an engine test-stand and the engine was operating in conditions of full load speed during the measurements. Concentrations of 23 components in exhaust gas were established with the use of the AVL SESAM FTIR system.

Key words: alternative fuels, bio-diesel, diesel engine, exhaust emission, smoke emission.