

**Marek SWAT, Krzysztof MADEJ**

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

## **WPLYW BIOKOMPONENTÓW PALIWOWYCH NA CHARAKTER EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH Z SILNIKA O ZS**

### **Słowa kluczowe**

Silnik o ZS, ochrona środowiska, biopaliwa, emisja PM.

### **Streszczenie**

Przedstawiono wyniki własnych badań wpływu biokomponentów paliwowych na emisję cząstek stałych PM z układu wylotowego silnika o zapłonie samoczynnym. Stwierdzono, że z eksploatacyjnego punktu widzenia najkorzystniejszym wydaje się paliwo B20, dla którego zaobserwowano mniejsze poziomy emisji wszystkich toksycznych składników spalin w porównaniu z emisjami uzyskanymi dla oleju napędowego, co przy niewielkich zmianach parametrów pracy silnika ( $M$ ,  $N_e$ ,  $g_e$ ) kwalifikuje to paliwo jako najlepsze. Ograniczenie poziomu emisji cząstek stałych w spalinach silnika o ZS przez badane biokomponenty paliwowe odbywa się głównie dzięki redukcji udziału frakcji nierozpuszczalnej INSOL w całkowitej masie emitowanych cząstek stałych.

### **Wprowadzenie**

Czynnikiem sprzyjającym rozwojowi prac nad alternatywnymi źródłami zasilania pojazdów jest wprowadzanie nowych zastrzonych norm dotyczących emisji spalin, których silniki zasilane tylko tradycyjnymi paliwami ropopochodnymi nie będą w stanie spełnić. Ważnym czynnikiem stymulującym wykorzy-

stanie alternatywnych układów paliwowych jest także fakt, że obecnie znane i udokumentowane zasoby ropy naftowej, przy obecnym zużyciu, wystarczą wg szacunkowych danych na 30–40 lat. Do najbardziej spopularyzowanych w eksploatacji lub będących w zaawansowanych stadiach badań naukowych alternatywnych metod zasilania pojazdów zalicza się: instalacje LPG i CNG, hybrydowe układy napędowe, instalacje wodorowe i ogniwa paliwowe oraz ogniwa fotowoltaiczne.

W ostatnich latach podjęto szerokie działania nad wprowadzeniem do praktycznego zastosowania w silnikach o ZS paliw innych niż oleje napędowe. Paliwa te pochodzą także ze źródeł odnawialnych, a ich główną zaletą jest mniejsza szkodliwość produktów ich spalania w silniku dla środowiska naturalnego [4, 5, 9, 11].

Jako paliwa niekonwencjonalne do silników o ZS mogą być stosowane produkty ciekłe, najczęściej estry olejów roślinnych [2, 3, 4, 5, 6, 8, 10], a także gazy: propan–butan, gaz ziemny i biogaz.

Paliwem niekonwencjonalnym, zdobywającym coraz większe uznanie, jest frakcja olejowa pochodząca z depolimeryzacji odpadowych tworzyw sztucznych. Zastosowanie depolimerów jako paliwa nabiera coraz większego znaczenia, ponieważ oprócz tego, że mogą być źródłem energii – rozwiązują również problem utylizacji uciążliwych dla środowiska odpadów.

## 1. Stanowisko badawcze

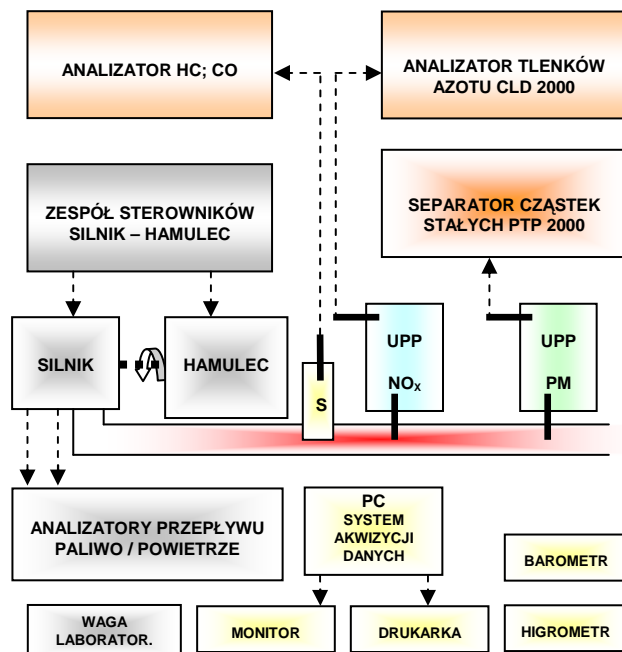
Zadanie zrealizowano, przeprowadzając własne badania eksperymentalne polegające na określeniu wpływu komponowanych paliw na poziom emisji cząstek stałych PM i pozostałych toksycznych składników spalin z silnika o ZS.

Jako źródła emisji cząstek stałych użyto silnika o zapłonie samoczynnym AD3.152 pracującego w standardowym układzie hamownianym (rys. 1), którego układ wylotowy wyposażono w układy poboru próbek spalin (do separatora cząstek stałych i analizatora tlenków azotu) oraz sondę analizatora węglowodorów i tlenku węgla.

Pomiaru emisji cząstek stałych dokonywano (na podstawie separowanej masy cząstek określanej metodą grawimetryczną) zgodnie z programowanymi 13-fazowymi testami badawczymi za pomocą separatora cząstek stałych PTP-2000 z mikrotunelem rozcieńczającym (firmy Pierburg).

Do pomiarów tlenków azotu użyto analizatora chemiluminescencyjnego CLD-2000 (firmy Pierburg), wykorzystującego zjawisko emisji promieniowania elektromagnetycznego towarzyszące reakcji tlenku azotu z ozonem.

Do pomiarów stężeń węglowodorów i tlenku węgla w spalinach wykorzystano analizator typu FTIR, model Gastester MHD-218 (firmy Hermann).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego, gdzie: S – sonda analizatora HC i CO, UPP – układy poboru próbek NO<sub>x</sub> i PM

Do badań użyto komponentów paliw o charakterystycznych cechach prezentowanych w zestawieniu poniżej (tabela 1). Przyjęto nomenklaturę w opisie wyników badań w postaci np. B20 (oznaczającą 20% objętościowy udział biokomponentu RME w mieszaninie z olejem napędowym).

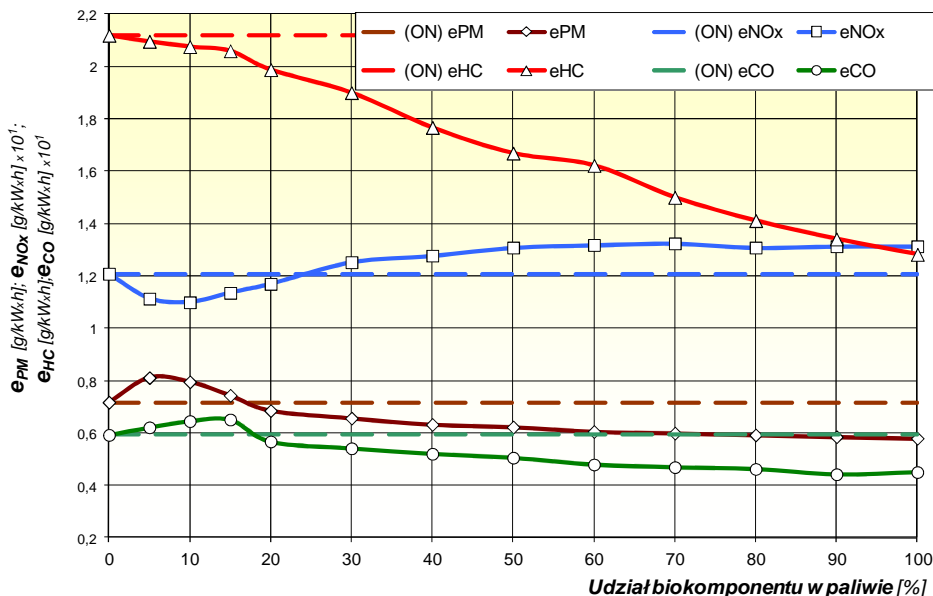
Tabela 1. Wybrane parametry paliw użytych do komponentów paliwowych

Lp.	Parametry	ON PN-EN 590	B 100 RME
1	Liczba cetanowa	51,4	51,8
2	Gęstość w tem.15°C g/cm <sup>3</sup>	835,4	882
3	Lepkość w temperaturze 40°C mm <sup>2</sup> /s	2,64	5,2
4	Zawartość siarki mg/kg	59	0,01
5	Wartość opałowa MJ/kg	42,5	38

## 2. Wyniki badań

Na rys. 2 przedstawiono wyniki badań zmiany emisji toksycznych składników spalin w teście 13-fazowym, powodowane różnym objętościowym udziałem procentowym biokomponentu w mieszaninie z olejem napędowym. Na ry-

sunku, dla porównania, naniesiono poziomy emisji uzyskane dla czystego oleju napędowego (linie przerywane).



Rys. 2. Zmiany emisji silnika (test 13-fazowy) spowodowane różnym udziałem biokomponentu w mieszaninie z olejem napędowym

Uzyskane wyniki nasuwają następujące spostrzeżenia:

- najmniej korzystnymi dla emisji PM i CO okazują się paliwa B5 do B15 (5% do 15% udziału biokomponentu w paliwie), bowiem w tym zakresie emisje PM i CO wykazują tendencję wzrostową, dla B5 wystąpił maksymalny wzrost emisji PM o 13%, a dla B15 maksymalny wzrost emisji CO o 10%,
- paliwa B5 do B15 są jednocześnie najbardziej korzystnymi pod względem emisji NO<sub>x</sub> – jedynie dla tego zakresu (zmian objętościowego udziału procentowego biokomponentu w oleju napędowym) zanotowano redukcję emisji tlenków azotu – dla B10 maksymalna redukcja o 9%,
- emisja HC zmniejsza się ze wzrostem objętościowego udziału procentowego biokomponentu w paliwie, a dla mieszanek powyżej B20 zmniejszenie jest proporcjonalne do objętościowego udziału procentowego biokomponentu w paliwie, najmniejszą emisję HC zaobserwowano dla B100 – zmniejszenie emisji o 39%,
- największe redukcje emisji HC (39%), CO (24%) i PM (19%) uzyskano dla paliwa B100, przy użyciu którego zanotowano również największy wzrost emisji NO<sub>x</sub> o 9%.

Z eksploatacyjnego punktu widzenia najkorzystniejszym wydaje się paliwo B20, dla którego zaobserwowano mniejsze poziomy emisji wszystkich toksycznych składników spalin, w porównaniu z emisjami uzyskanymi dla oleju napędowego, co przy niewielkich zmianach parametrów pracy silnika ( $M$ ,  $N_e$ ,  $g_e$  – patrz rys. 3) kwalifikuje to paliwo jako najlepsze.

Charakterystycznym wydaje się także paliwo B50, ponieważ wzrost powyżej 50% objętościowego udziału biokomponentu w paliwie powoduje osłabienie tendencji redukcji emisji PM, HC i CO, a także praktycznie – znikome przyrosty emisji tlenków azotu.

W zestawieniu poniżej (tabela 2) zaprezentowano procentowe zmiany emisji (w odniesieniu do oleju napędowego, gdzie: „+” – oznacza wzrost, a „-” – zmniejszenie emisji) dla wybranych „charakterystycznych” paliw biokomponentowych.

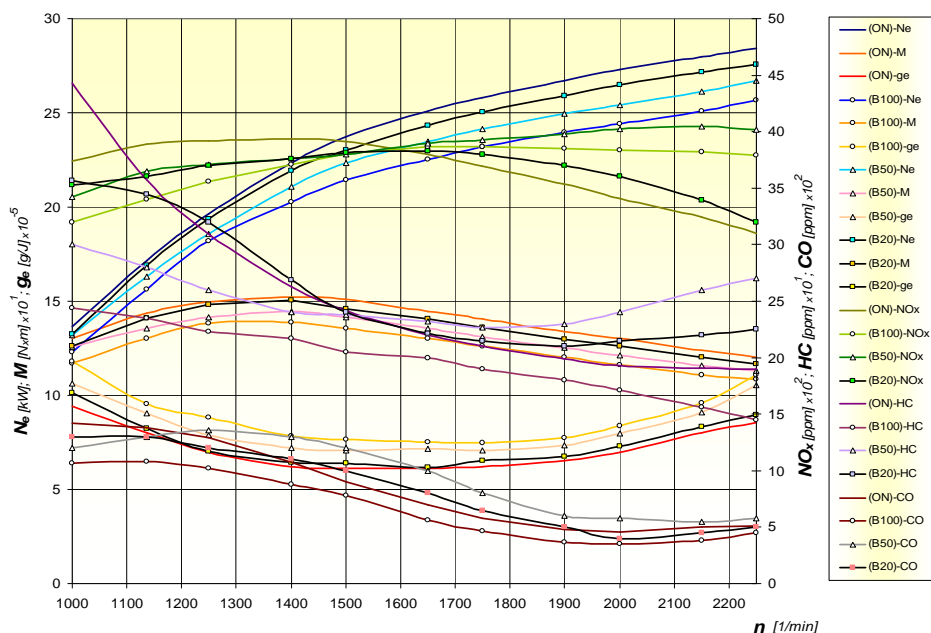
Tabela 2. Zmiany emisji silnika zasilanego paliwami biokomponentowymi

	PM	HC	CO	NO <sub>x</sub>
ON	0,717 g/kW·h	2,119 g/kW·h	5,92 g/kW·h	12,08 g/kW·h
B20	-4%	-6%	-4%	-3%
B50	-13%	-21%	-15%	+ 8%
B100	-19%	-39%	-24%	+ 9%

Z danych (dla wybranych paliw) przedstawionych na charakterystyce eksploatacyjnej silnika (rys. 3) wynika, że dla B20 (w porównaniu z ON) wzrost jednostkowego zużycia paliwa oraz zmniejszenie mocy i momentu rozwijanego przez silnik są niewielkie około 2% do 3%. Zdecydowanie pogarszają się parametry pracy silnika dla B50, spadek mocy i momentu o około 8% do 10% przy 15% wzroście  $g_e$ . Dla czystego biokomponentu (B100) zmniejszenie mocy i momentu dochodzi do 12% (maksymalnie 14%) przy jednoczesnym wzroście  $g_e$  do 22% (23%), czego główną przyczyną jest przede wszystkim mniejsza wartość opałowia (B100) w porównaniu z olejem napędowym.

Dla badanego silnika znamieny jest zakres średniej prędkości obrotowej (1500–1600) na charakterystyce eksploatacyjnej – poniżej tej prędkości – zmniejszenie (w porównaniu z ON), powyżej – wzrost stężeń NO<sub>x</sub> (najmniejszy dla B20). Powyżej tej prędkości obrotowej obserwowano również dla B50 niewielkie wzrosty stężeń HC i CO w spalinach. Dla pozostałych przypadków rejestrowano wyraźną redukcję poziomów stężeń HC i CO dla całego zakresu prędkości obrotowych silnika.

W składzie strukturalnym cząstek stałych (przy zasilaniu olejem napędowym) dominuje forma siarczanowa. Siarka zawarta w paliwie prawie całkowicie utlenia się w procesie spalania do SO<sub>2</sub> i w większości w takiej formie zostaje usuwana ze spalinami, pozostała część podlega konwersji do SO<sub>3</sub>, tym większej, im wyższe temperatura i stężenie tlenu w spalinach. Trójtlenek siarki przez



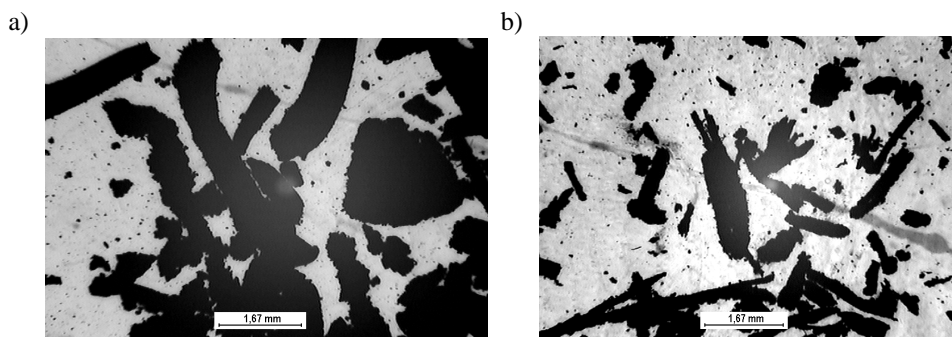
Rys. 3. Charakterystyka badanego silnika zasilanego olejem napędowym (ON) i biopaliwami (B100, B50, B20)

wysokie powinowactwo z wodą (w reakcji egzotermicznej tworzy się kwas siarkowy), tworzy siarczan adsorbowane przez sadzę silnikową, powodując przyrost nierozpuszczalnej frakcji INSOL cząstki stałej.

Prawdopodobnie główną przyczyną mniejszej emisji PM (przy zasilaniu biokomponentem) jest eliminacja siarczanowej części nierozpuszczalnej frakcji INSOL cząstek (a tym samym redukcja całkowitej ilości masy cząstek), ponieważ paliwo biokomponentowe (B100) nie zawiera w swoim składzie pierwiastkowym siarki. Odbywa się to dzięki większemu udziałowi beziarkowego paliwa w procesie formowania cząstek na etapie tworzenia sadzy wtórnej, która powstaje najczęściej z sadzy pierwotnej, w okresie, który rozpoczyna się jeszcze przed otwarciem zaworu wylotowego i trwa aż do wydalenia spalin poza układ wylotowy. W warunkach szybko obniżającej się temperatury, wynikającej z rozprężania i ochładzania spalin, krystalizacja sadzy łączy się w struktury agregatowe i aglomeratowe, a dodatkowo warunki te sprzyjają niskotemperaturowej cyklizacji związków poliacetylenowych, które po odwodornieniu przyjmują postać wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ciężkich węglowodorów. Spadek temperatury spalin sprzyja także zamrażaniu przejściowych struktur chemicznych na etapie częściowego utlenienia lub niedokończonego ich rozpadu. Węglowodory te w stanie gazowym lub skondensowanym są adsorbowane przez powierzchnie agregatów i aglomeratów sadzy. W tych

warunkach ma miejsce ciągła przebudowa struktur ciężkich węglowodorów i zmiana ich stanu skupienia. Lokalnie węglowodory w fazie gazowej mogą kondensować i osiadać na powierzchniach sadzy i innych cząstek (np. siarczany i azotany) lub odwrotnie, parować i oddzielać się od tych cząstek.

W wyniku przeprowadzonych badań mikroskopowych (rys. 4) stwierdzono wyraźne różnice w strukturze cząstek stałych pochodzących ze spalania paliw ON, B100 i ich mieszanin.



Rys. 4. Porównanie widoku makrostruktur cząstek stałych (optyczny mikroskop pomiarowy), dla paliw: a) olej napędowy (ON), b) biokomponent RME (B100)

Dla paliw powyżej B30 radykalnie zmienia się charakter emisji  $\text{NO}_x$ . Ponieważ rozpylenie paliwa ( $B > 30$ ) przebiega inaczej niż oleju napędowego (ze względu na różnice w lepkości obu paliw, dla  $B > 30$  znacząco rośnie udział paliwa o dwukrotnie większej lepkości), to intensyfikacja procesu spalania powoduje wzrost lokalnych temperatur spalania, co sprzyja zwiększeniu emisji tlenków azotu (rys. 2). Prawdopodobnie większa aktywność tlenu i wyższe temperatury spalania powodują, że sadza pierwotna zostaje w znacznym stopniu spalona w komorze spalania, co przy jednoczesnym uwolnieniu HC (wzrost emisji) powoduje, że adsorpcja fizyczna na powierzchni – już sadzy wtórnej – jest znacznie ograniczona. Ograniczenie to jest natury ilościowej, mniejsza ilość adsorbenta (sadzy wtórnej) i substancji adsorbowanych, a także jakościowej – choćby z racji ograniczenia cyklizacji związków poliacetylenowych, które po odwodornieniu przyjmują postacie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ciężkich węglowodorów. Prawdopodobnie wyższe temperatury obiegu uniemożliwiają „zrzepnięcie” fazy ciekłej i wcześniej uwalniają fazę gazową HC, a aktywny tlen ma właściwości umożliwiające utlenianie węglowodorów nie tylko w masie spalin, ale także w masie samych cząstek stałych.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analizy można sformułować następujące wnioski:

Z eksploatacyjnego punktu widzenia najkorzystniejszym wydaje się paliwo B20, dla którego zaobserwowano mniejsze poziomy emisji wszystkich toksycznych składników spalin w porównaniu z emisjami uzyskanymi dla oleju napędowego, co przy niewielkich zmianach parametrów pracy silnika ( $M$ ,  $N_e$ ,  $g_e$ ) predestynuje to paliwo jako najlepsze.

Biokomponenty paliwowe z racji swojej obecności w procesie spalania „uczestniczą” w procesie formowania tzw. sadzy pierwotnej jako finalnego produktu wysokotemperaturowego rozpadu paliwa i sadzy wtórnej powstającej w warunkach szybko obniżającej się temperatury w końcowej fazie procesu utleniania w komorze spalania. Wpływają one różnie na strukturę cząstek poprzez zmianę udziałów części rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej cząstki, a więc w sumie na efektywność redukcji masy cząstek.

Ograniczenie poziomu emisji cząstek stałych w spalinach silnika o ZS przez badane biokomponenty paliwowe odbywa się głównie dzięki redukcji udziału frakcji nierozpuszczalnej INSOL w całkowitej masie emitowanych cząstek stałych.

Powyżej 20% udziału biokomponentu w mieszaninie z olejem napędowym daje znaczące efekty w ograniczeniu emisji cząstek stałych. Największe efekty w tym względzie uzyskano dla czystego estru metylowego oleju rzepakowego.

Cząstki stałe emitowane w standardowych warunkach mają strukturę aglomeratową z dużym udziałem krzepnącej fazy ciekłej, natomiast cząstki stałe pochodzące ze spalania biokomponentu mają już strukturę agregatową z niewielkimi wtrąceniami aglomeratów, w której nie zaobserwowano wyraźnej fazy ciekłej. Różnice w wielkościach cząstek są znaczne. Cząstki emitowane w warunkach standardowych są od kilku do kilkunastu razy większe od cząstek stałych, których źródłem są biokomponenty.

## Bibliografia

1. Baczewski K., Kałdoński T.: Paliwa do silników o zapłonie samoczynnym. WKŁ, Warszawa 2004.
2. Demirbaş A.: Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey. *Energy Conversion and Management* 2003, Volume 44, pp. 2093–2109.
3. Demirbaş A.: Biodiesel from vegetable oils via transesterification in supercritical methanol. *Energy Conversion & Management. Energy Conversion and Management* 43 (2002), pp. 2349–2356.



4. Dorado M.P., Ballesteros E., Arnal J.M., Gómez J., López F.J.: Exhaust emissions from a Diesel engine fuelled with transesterified waste olive oil. *Fuel* 2003, Volume 82, pp. 1311–1315.
5. Labeckas G., Slavinskas S.: Performance and exhaust emission characteristics of direct-injection Diesel engine when operating on shale oil. *Energy Conversion & Management* 46 (2005), pp. 139–150.
6. Lotko W.: Studium zastosowań paliw alternatywnych do silników o zapłonie samoczynnym. ITeE, Radom 2001.
7. Ma Fangrui, Hanna M.A.: Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology* 70, 1999, pp. 1–15.
8. Mysłowski J.: Próba oceny możliwości zastosowania paliw pochodzenia rzepakowego jako dodatku do oleju napędowego. IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Pojazd a Środowisko” Jedlnia-Letnisko 2003, s. 345–352.
9. Raheman H., Phadataré A.G.: Diesel engine emissions and performance from blends of karahja methyl ester and diesel. *Biomass and Bioenergy* 2004, Volume 27, pp. 393–397.
10. Silva da Neto F., Salgado Prata A., Teixeira J.R.: Technical feasibility assessment of oleic sunflower methyl ester utilisation in Diesel bus engines. *Energy conversion and Management* 2003, Volume 44, pp. 2857–2878.
11. Szlachta Z.: Zasilanie silników wysokoprężnych paliwami rzepakowymi. WKŁ, Warszawa 2002.

Recenzent:  
Zbigniew ŻMUDKA

## **The effect of bio-components of fuel on the emission character of particulate matter from diesel engines**

### **Key words**

Diesel engine, environmental protection, biodiesel, particulate matter emission.

### **Summary**

Research results are presented of the bio-components of fuel's effect on the particulate matter emission from the exhaust systems of diesel engines. It was found that B20 fuel is the most preferred operationally. B20 was observed to have lower levels of all toxic exhaust components emissions, compared to emissions obtained for diesel fuel, because B20 seems to be the best for small changes of engine parameters ( $M$ ,  $N_e$ ,  $g_e$ ).

The reduction of the particulate matter emission level in the diesel engine exhaust gases by tested fuel bio-components is mainly due to the reduction of the INSOL insoluble fraction participation in the total mass of emitted particulate matter.