

Jerzy MERKISZ
Miłostaw KOZAK
Maciej ANDRZEJEWSKI
Andrzej ZIÓŁKOWSKI

PTNSS–2013–SC–134

Dimensional distribution of particulate matter emitted from CI engine fueled by diesel fuel/RME blends

Abstract: The article presents some results of the dimensional distribution of particulate matter emitted from a compression ignition engine fueled by different types of fuel over the ESC cycle. Four different diesel fuel/RME blends were tested. These blends contained respectively: 5 (conventional diesel fuel), 20, 50 and 100 % RME. The aim of this study was to determine the potential of RME in reducing particulate emissions from vehicles engines. The Engine Exhaust Particle Sizer 3090 by TSI Inc. (measurement of the dimensional distribution) was used to measure PM emissions. The results show that the smallest number of PM was emitted when the engine was fuelled with the blend containing an intermediate volume of RME, namely 20 %.

Key words: CI engine, biofuel, RME, particulate matter emissions

Rozkład wymiarowy cząstek stałych emitowanych przez silnik ZS zasilany mieszaninami oleju napędowego i RME

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań rozkładów wymiarowych cząstek stałych silnika o zapłonie samoczynnym w teście ESC zasilanego różnym rodzajem paliwa. W badaniach stosowano cztery paliwa: konwencjonalny olej napędowy, RME w czystej postaci oraz dwie mieszaniny wymienionych paliw, zawierające odpowiednio 20 i 50 % RME. Celem badań było określenie potencjału RME w zmniejszaniu emisji cząstek stałych z jednostek napędowych pojazdów. Pomiarów rozkładów wymiarowych cząstek stałych dokonano z wykorzystaniem spektrometru masowego Engine Exhaust Particle Sizer 3090 firmy TSI Inc. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że najmniejsze stężenie liczbowe cząstek stałych w cyklu ESC występuje przy zasilaniu silnika paliwem o pośredniej zawartości RME (20 %).

Słowa kluczowe: silnik ZS, biopaliwo, RME, emisja cząstek stałych

1. Wprowadzenie

Zastosowanie paliw odnawialnych – w szczególności biopaliw ciekłych i gazowych – ma na celu przede wszystkim ochronę zasobów naturalnych Ziemi, zmniejszenie emisji szkodliwego dwutlenku węgla do atmosfery i uniezależnienie się od paliw kopalnych. Ponadto ich zastosowanie często wpływa także korzystnie na poziom toksyczności spalin silników pojazdów, a więc i na stopień zanieczyszczenia powietrza w danym regionie.

Współcześnie na europejskim rynku paliwowym najważniejszym biopaliwem ciekłym jest FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*), produkowane przede wszystkim w postaci estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego RME (*Rapeseed Methyl Esters*). Przewiduje się, że wielkość produkcji i zużycia tego rodzaju biopaliwa będzie nadal wzrastać, z powodu rosnącego zapotrzebowania na paliwa do silników ZS. Obecnie do konwencjonalnych olejów napędowych dodaje się FAME w ilości do 7%. Szybko wzrasta także jego zużycie w czystej postaci.

Zastosowanie FAME w czystej postaci lub w postaci dodatku do paliwa zasadniczego, znacząco zmniejsza toksyczność spalin silnika o zapłonie

samoczynnym. W większości przypadków FAME powoduje redukcję emisji tlenu węgla, węglodorów i cząstek stałych oraz wzrost emisji tlenków azotu [5]. W światowej literaturze dostępnych jest wiele prac związanych z tym zagadnieniem [1–4, 6, 7]. Należy przy tym jednak zaznaczyć, że duża część dostępnych w literaturze prac naukowo-badawczych dotyczących paliw estrowych została przeprowadzona z wykorzystaniem jednostek napędowych starszej generacji. Jest to głównie wynikiem obserwowanego ostatnio dynamicznego rozwoju silników ZS. Ponadto wiele wspomnianych prac dotyczy pomiarów emisji tylko w jednym lub kilku punktach pracy silnika, co daje jedynie ograniczony pogląd na wpływ stosowania FAME na toksyczność jego spalin.

Wyżej wymienione kwestie zdecydowały o podjęciu realizacji badań opisanych w niniejszym artykule. Badania obejmowały pomiar zawartości (liczby) cząstek stałych w spalinach emitowanych przez nowoczesny, samochodowy silnik o zapłonie samoczynnym, zasilany porównawczo konwencjonalnym olejem napędowym, RME oraz mieszaninami obu tych paliw w warunkach homologacyjnego testu ESC (*European Stationary Cycle*).

2. Metodyka badań

Badania rozkładu wymiarowego cząstek stałych wykonano w teście ESC na silnikowym stanowisku dynamometrycznym. Test ten składa się z 13 punktów pracy – nazywanych fazami testu. Rozkład poszczególnych faz wraz z ich udziałem przedstawiono na rysunku 1. Przygotowanie punktu pracy odbywa się w pierwszych 20 s fazy. Dopuszczalny błąd prędkości obrotowej dla punktu pomiarowego wynosi ± 50 obr/min, momentu obrotowego $\pm 2\%$ $M_{0\ max}$ dla badanej prędkości obrotowej. Czas pracy silnika w poszczególnych punktach pomiarowych wynosi 2 min (wyjątek stanowi pierwsza faza – 4 min), a więc cały test trwa 28 min. Prędkości obrotowe są zdefiniowane następująco, na podstawie charakterystyki pełnej mocy [9]:

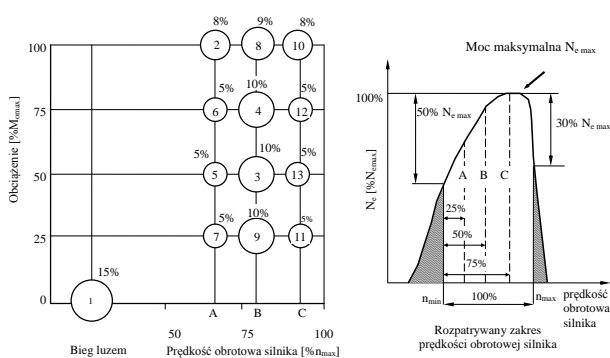
- prędkość obrotowa maksymalna (n_{max}) – po przekroczeniu mocy maksymalnej, gdy silnik uzyskuje $70\% N_{e\ max}$,
- prędkość obrotowa minimalna (n_{min}) – silnik uzyskuje $50\% N_{e\ max}$,
- poszczególne prędkości obrotowe faz A, B, C oblicza się z zależności:

$$A = n_{min} + 0,25 \cdot (n_{max} - n_{min})$$

$$B = n_{min} + 0,50 \cdot (n_{max} - n_{min})$$

$$C = n_{min} + 0,75 \cdot (n_{max} - n_{min})$$

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy dla każdej fazy pracy silnika wyznaczyć średnie wartości poszczególnych wielkości. Zaleca się, aby wartości te były wyznaczone na podstawie pomiarów przeprowadzonych w ostatnich 60 s trwania fazy.



Rys. 1. Znormalizowany przebieg testu ESC [9]

Na silnikowym stanowisku hamulcowym (rys. 2) zainstalowany był silnik 1,3 SDE o objętości skokowej $1,3\ dm^3$. Szczegółowe dane techniczne silnika użytego w badaniach są następujące:

- typ silnika: ZS, 4-cylindrowy, rzędowy,
- objętość skokowa: $1,251\ dm^3$,
- moc maksymalna: 51 kW przy 4000 obr/min,
- maksymalny moment obrotowy: 180 Nm przy 1750 obr/min,
- układ zasilania: wtrysk bezpośredni *common rail*, doładowanie turbosprężarką (*intercooler*),

- liczba zaworów: 4 na cylinder,
- maksymalne ciśnienie wtrysku: 140 MPa,
- podział dawki paliwa: do 4 wtrysków na cykl,
- układy kontroli emisji: utleniający reaktor katalityczny DOC + EGR,
- klasa emisyjna: Euro 4.



Rys. 2. Stanowisko badawcze – hamownia silnikowa wraz z aparaturą pomiarową

Silnik badawczy zasilano następującymi paliwami (tab. 1):

- olej napędowy (ON),
- olej napędowy i 20% RME (B20),
- olej napędowy i 50% RME (B50),
- RME w czystej postaci (B100).

Tabela 1. Właściwości oleju napędowego (ON) i RME

	ON	RME (B100)
Liczba cetanowa [-]	52,6	51,0
Indeks cetanowy [-]	52,8	–
Gęstość w temp. 15°C [kg/m ³]	833,5	883,0
Lepekność w temp. 40°C [mm ² /s]	2,66	4,46
Zawartość siarki [ppm]	9,9	0,8
Zawartość FAME [% (v/v)]	4,9	98,5
Zawartość WWA [% (m/m)]	2,5	–
Liczba jodowa [g J/100g]	–	115
Przebieg destylacji	E250 [% (v/v)]	39,0
	E350 [% (v/v)]	94,5
	T95 [°C]	350,6

Do pomiaru wielkości cząstek stałych wykorzystano analizator 3090 EEPS (*Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer*) firmy TSI Inc. (rys. 3). Analizator umożliwił przeprowadzenie pomiaru wielkości cząstek stałych w zakresie od 5,6 nm do 560 nm ich średnicy, z częstotliwością pomiaru 10 razy na sekundę (tab. 2).



Rys. 3. Widok miernika wielkości cząstek stałych EEPS™ firmy TSI [8]

Tabela 2. Dane techniczne analizatora do określania rozkładu wymiarowego cząstek stałych EEPS [8]

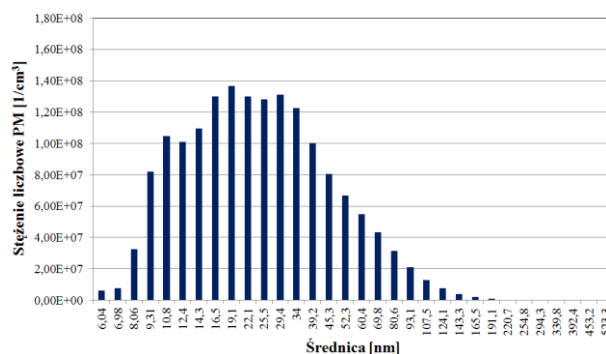
Parametr	Wartość
Rozmiar mierzonych cząstek	5,6÷560 nm
Liczba kanałów pomiarowych	16 kanałów na dekadę (32 całkowicie)
Liczba kanałów elektrod	22
Rozdzielczość	10 rozmiarów kanałów/s
Przepływ próbki spalin	10 dm ³ /min
Przepływ sprężonego powietrza	40 dm ³ /min
Temperatura próbki wejściowej	10÷52°C
Temperatura pracy urządzenia	0÷40°C

3. Wyniki badań

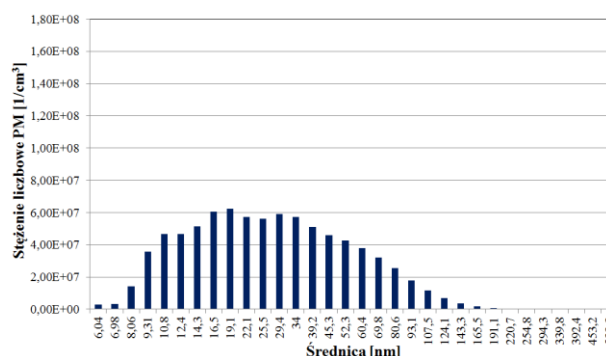
Przy wykorzystaniu analizatora EEPS firmy TSI określono zawartość cząstek stałych w każdej fazie homologacyjnego europejskiego testu stacjonarnego ESC. Określono rozkłady wymiarowe – zdefiniowane jako zależność stężenia PM od ich średnicy aerodynamicznej – cząstek stałych dla poszczególnych, użytych do zasilania silnika paliw: ON, B20, B50 i B100. Rezultaty przedstawiono w postaci charakterystyk widmowych rozkładu wymiarowego cząstek stałych (wielkości uśrednionych w czasie pomiaru). Dla oleju napędowego zaobserwowano największe stężenie liczbowe cząstek z zakresu średnic od 16,5 nm do 34 nm, które wynosiło około $1,3E+08$ $1/cm^3$ dla każdego przedziału średnic (rys. 4). Dla mieszaniny oleju napędowego i 20% RME (rys. 5) stężenie liczbowe PM z zakresu średnic 10,8÷52,3 nm było zbliżone do siebie – wynosiło $4,8\cdot 6E+07$ $1/cm^3$. Zbliżone rozkłady wymiarowe zarejestrowano dla oleju napędowego z 50% dodatkiem RME (rys. 6) oraz czystego RME (rys. 7). W obu przypadkach największe stężenie liczbowe cząstek stałych wystąpiło dla zakresu średnic 9,31÷22,1 nm. W odniesieniu do oleju napędowego jest to mniejszy zakres średnic. Tym samym wnioskować można, że dodatek RME do oleju napędowego skutkuje formowaniem cząstek stałych o mniejszych średnicach. Dla mieszaniny

oleju napędowego i 20% RME największe stężenie liczbowe cząstek stałych wystąpiło dla zakresu średnic od 10,8 nm do 52,3 nm.

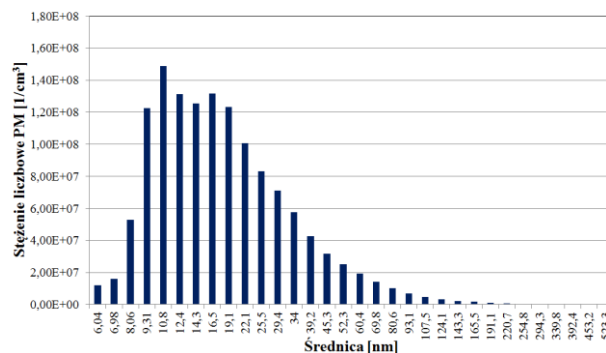
Analiza uśrednionej wartości stężenia liczbowego PM dla całego testu ESC pozwala stwierdzić, że dodatek estrów metylowych kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego RME do konwencjonalnego oleju napędowego ma znaczący wpływ na zmniejszenie zawartości cząstek stałych w emitowanych przez silnik spalinach. Jest to szczególnie widoczne w przypadku zastosowania 20-procentowego dodatku RME do oleju napędowego – w tym przypadku zarejestrowano najniższe stężenie liczbowe cząstek stałych.



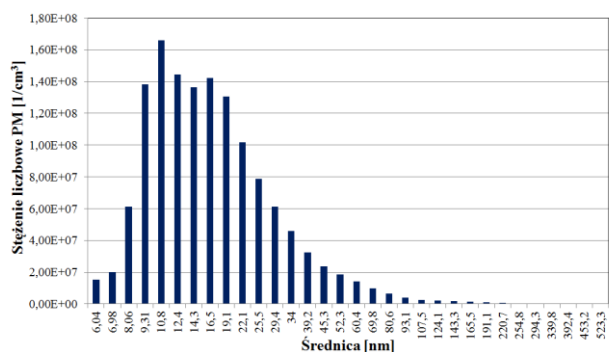
Rys. 4. Stężenie liczbowe cząstek stałych w zależności od średnicy dla oleju napędowego



Rys. 5. Stężenie liczbowe cząstek stałych w zależności od średnicy dla oleju napędowego i 20% RME (B20)



Rys. 6. Stężenie liczbowe cząstek stałych w zależności od średnicy dla oleju napędowego i 50% RME (B50)



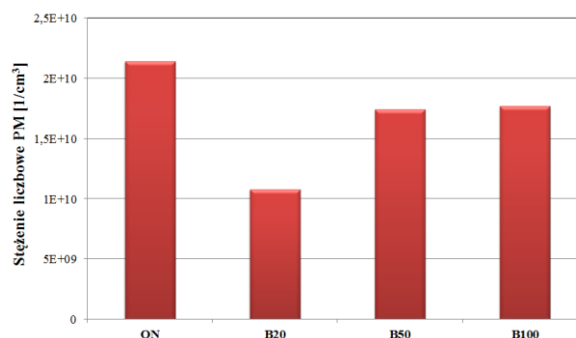
Rys. 7. Stężenie liczbowe cząstek stałych w zależności od średnicy dla czystego RME (B100)

5. Wnioski

Zasilanie silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym paliwami zawierającymi RME przynosi wymierne korzyści w postaci zmniejszonej emisji cząstek stałych (rys. 8):

1. Wykonane badania wykazały istotny, korzystny wpływ RME – jako składnika paliwa – na stężenie liczbowe cząstek stałych, emitowanych przez nowoczesny, turbodoładowany silnik ZS, zasilany w systemie *common rail*.
2. Charakterystyka stężenia cząstek stałych (jako funkcja ich średnicy) jest uzależniona od wielkości dodatku biopaliwa w postaci RME do konwencjonalnego oleju napędowego.

3. Stężenie liczbowe cząstek stałych w teście ESC bardzo wyraźnie zmniejszyło się dla paliw zawierających RME. Spadek tego stężenia nie był jednak proporcjonalny do zawartości RME w paliwie.
4. W świetle wykonanych badań, pod względem minimalnego stężenia liczbowego cząstek stałych najkorzystniejsze jest stosowanie RME jako 20-procentowego dodatku do ON; dla paliwa B20 odnotowano o połowę niższy poziom stężenia PM niż dla oleju napędowego.



Rys. 8. Stężenie liczbowe cząstek stałych określone dla poszczególnych paliw (średnia dla testu ESC)

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

DOC Diesel Oxidation Catalyst/*utleniający reaktor katalityczny dla silników ZS*
 EGR Exhaust Gas Recirculation/*układ recyrkulacji spalin*
 ESC European Stationary Cycle/*statyczny europejski cykl badawczy*

FAME Fatty Acid Methyl Esters/*estry metylowe kwasów tłuszczowych olejów roślinnych*
 RME Rapeseed Methyl Esters/*estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego*
 SDE Small Diesel Engine/*silnik ZS o małej objętości skokowej*

Bibliography/Literatura

- [1] Assessment and Standards Division (Office of Transportation and Air Quality of the US Environmental Protection Agency). A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions. EPA420-P-02-001 (2002).
- [2] Daisuke Kawano, Hajime Ishii and Yuichi Goto: Effect of biodiesel blending on emission characteristics of modern diesel engine. SAE Paper 2008-01-2384.
- [3] Fontaras G., Karavalakis G., Kousoulidou M., Tzamkiozis T., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S. and Samaras Z.: Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles. Fuel, No. 88 (2009).
- [4] Fujia Wu, Jianxin Wang, Wenmiao Chen and Shijin Shuai: A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels. Atmospheric Environment, No. 43 (2009).
- [5] Lauperta M., Armas O. and Rodriguez-Fernandez J.: Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. Progress in Energy and Combustion Science, No. 34 (2008).
- [6] Lei Zhu, Wugao Zhang, Wei Liu and Zhen Huang: Experimental study on particulate and NO_x emissions of a diesel engine fueled with ultralow sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends. Science of the Total Environment, No. 408 (2010).
- [7] Swat M., Madej K.: The influence of biodepolymer fuel components on the exhaust emissions from diesel engine. Combustion Engines/Silniki Spalinowe, No. 1/2013 (152), p. 79-88, (2013).

[8] Materiały firmy TSI Inc.: www.tsi.com.

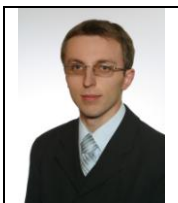
Mr Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz – profesor na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Maciej Andrzejewski, MSc., Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Maciej Andrzejewski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



[9] Worldwide Emissions Standards. Heavy Duty and Off-Highway Vehicles. Delphi 2012/2013 (www.delphi.com).

Mr Miloslaw Kozak, DEng. – doctor in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Dr inż. Miłosław Kozak – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.



Mr Andrzej Ziolkowski, MSc., Eng. – PhD student in the Faculty of Machines and Transport at Poznan University of Technology.

Mgr inż. Andrzej Ziolkowski – doktorant na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

