

ANALYSIS OF PARTICULATE MATTER EMISSION CHANGES WITH RAPS FUEL POWERED OF DIESEL ENGINE

Karol Ekert

Institute of Aviation

02-256 Warszawa, Al. Krakowska 110/114,
tel. (+22) 846 08 01 w 618 fax (+22) 846 44 32
e-mail: ekert@ilot.edu.pl

Abstract

Fulfilment of the requirements for limiting level of Particulate Matter (PM) emission in Diesel engines exhaust gases is necessity for significant acceleration of research works and to development of these category I.C. engines. Emission level of PM and other toxins from engine powered by hydrocarbon oil fuel or biofuel will be drastically limited by many countries (with USA-EPA and EU-EURO) official regulations in the years to come.

The theoretical model phenomenon and its the PM emission estimation research-computational algorithm is formulated and presented. This research and development work results and analysis for complex modification and Raps Oil Methyl Esters (ROME) fuelling of T370 Diesel engine of 78 kW shaftpower is presented. Its aim is to fulfil the EURO (ECE R49) requirements. The combustion chamber shape, fuel supply system and injectors were subjects of improvement. Intake system and charged air cooling layout were varied in co-ordination with engine operation control adjustments. The most important results of PM emission research, with emission of other components (CO, HC and NOx) in the background are reported in function of chosen design, regulation and engine powered by hydrocarbon diesel oil fuel or ROME fuel. Formulated conclusions refer to trends of emission changes of PM and gaseous components during Diesel engines complex modernisation and ROME fuelling.

ANALIZA ZMIAN EMISJI CZĄSTEK STAŁYCH PRZY ZASILANIU PALIWEM RZEPAKOWYM SILNIKA ZS

Streszczenie

Spełnienie wymagań ograniczenia poziomu emisji cząstek stałych (PM) w spalinach silników z zapłonem samoczynnym ZS wymaga znacznego przyspieszenia prac badawczych i rozwoju tej kategorii silników spalinowych. Poziom emisji PM oraz innych toksyn pochodzących z silników ZS zasilanych paliwami węglowodorowymi lub paliwami roślinnymi jest drastycznie ograniczany w najbliższych latach przez przepisy urzędowe wielu krajów w tym USA-EPA i EU-EURO.

Sformułowano i przedstawiono teoretyczny model zjawiska oraz badawczo-obliczeniowy algorytm estymacji emisji cząstek stałych PM. Przedstawiono wyniki analiz i prac badawczo-rozwojowych nad kompleksową modyfikacją silnika T370 z zapłonem samoczynnym o mocy 78 kW zasilanego olejem napędowym lub paliwem rzepakowym (ROME). Badania przeprowadzono w celu spełnienia warunków EURO (Regulamin ECE R49). Dopracowaniu poddano kształt komory spalania oraz układ paliwowy i wtryskiwacze. Przeprowadzono zmiany układów doładowania i chłodzenia powietrza doładującego w połączeniu z regulacjami systemów sterowania pracą silnika. Najważniejsze wyniki badań i obliczeń emisji cząstek stałych PM na tle innych składników emisji (CO, HC i NOx) przedstawiono w zależności od wybranych parametrów konstrukcyjnych, regulacyjnych oraz zasilania silnika olejem napędowym lub paliwem ROME. Wyciągnięto wnioski dotyczące kierunków zmian emisji cząstek stałych PM i składników gazowych spalin przy kompleksowej modernizacji silników ZS i zasilaniu paliwem rzepakowym (ROME).

1. Cel badań

W artykule omówiono wybrane wyniki prac badawczo-rozwojowych prowadzonych w Instytucie Lotnictwa nad silnikami z zapłonem samoczynnym (ZS). Prace te miały na celu

obniżenie emisji spalin przez wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych połączonych z integracją osprzętu oraz regulacją parametrów silnika. Istotnym czynnikiem wpływającym na emisję są również parametry stosowanych paliw, wśród których zainteresowanie budziły i nadal budzą biopaliwa w tym Estry Metylowe Oleju Rzepakowego (Raps Oil Methyl Esters - ROME). Przyspieszenie prac badawczych i rozwój silników ZS jest wywołany koniecznością ograniczenia emisji toksyn wymaganą przez przepisy urzędowe USA-EPA i EU-EURO opisane w pracach [1-10]. Emisja toksyn pochodzących z silników ZS zasilanych paliwami węglowodorowymi lub paliwami roślinnymi będzie nadal w nadchodzących latach drastycznie ograniczana [1].

Wśród toksyn pochodzących z silników ZS trudną do ograniczenia jest emisja cząstek stałych (PM) [2-10] ze względu na wieloskładnikową strukturę z udziałem nanocząstek [6] oraz złożoność i niedoskonałość stosowanych metod pomiarowych. Prowadzone prace [5-10] wymagały opracowania narzędzi badawczo-obliczeniowych umożliwiających i ułatwiających pogłębioną analizę wpływu wymienionych czynników na obniżenie emisji zanieczyszczeń spalin silnika do poziomów wymaganych przez odpowiednie przepisy. Szczególną uwagę poświęcono opracowaniu i rozwojowi metod badań i obliczeń emisji cząstek stałych (PM).

2. Cząstki stałe

Składnik spalin silnikowych nazwany „cząstki stałe” nie posiadający jednoznacznej fizycznej definicji obejmuje sumę substancji stałych i ciekłych, które zbierane są na specjalnym filtrze teflonowym. Początkowo zgodnie z Regulaminem ECE R-49 na masę emisji cząstek stałych stosowano oznaczenie PT. Stosowano również czasami oznaczenie P lub PM(PT), a w ostatnich latach obowiązuje oznaczenie PM (Particulate Matter).

Cząstki stałe składają się głównie ze stałej frakcji węgla i najcięższych frakcji węglowodorowych (sadza silnikowa), stałych związków siarki (siarczany), azotanów, cząstek związków metali oraz innych związków i zanieczyszczeń. Całkowita masa cząstek stałych PM, oraz ich skład i struktura zależy od szeregu czynników związanych z pracą silników spalinowych, oraz właściwościami stosowanego paliwa.

Badania masy i analiza struktury cząstek stałych znajdujących się w spalinach silników były rozwijane stopniowo. Początkowo jako rozszerzenie badań zadymienia spalin S (Smoke) w spalinach silników ZS. Związane to było ze znaczną uciążliwością spalin z silników ZS (duże zadymieniem, nieprzezroczystość i przykry zapach) w których ze względu na charakterystyczne cechy procesu spalania występują najwyższe stężenia PM. Następnie badania PM objęły silniki turboodrzutowe. Obecnie badanie masy PM wprowadzane jest praktycznie we wszystkich rodzajach silników nie tylko ze względów poznawczych lecz przede wszystkim ze względu na zaostrzenie wymaganych ograniczeń urzędowych emisji PM. Zaostrzenie to wprowadzane jest stopniowo w kolejnych latach we wszystkich krajach świata łącznie z ograniczeniami zadymienia spalin S oraz emisji składników gazowych (CO, HC, NO_x).

W roku 1988 Stany Zjednoczone w regulaminach Agencji Ochrony Środowiska EPA (Environmental Protection Agency) wprowadziły do przepisów urzędowych badania emisji PM w spalinach silników trakcyjnych. Kraje EU w roku 1992, a Polska w roku 1993 wprowadziły obowiązek badań PM w przepisach EURO-I narzucających 13-o stopniowy cykl testu według Regulaminu ECE R-49. Test ten stosowany był w badaniach silników z zapłonem samoczynnym ZS do autobusów i ciężkiej trakcji drogowej HDDE (Heavy Duty Diesel Engines). Regulamin ECE R-49 obowiązywał również w przepisach EURO-II wprowadzonych w latach 1995÷1996. W roku 1999 w ramach EURO-II, dla silników montowanych w pojazdach przyjaznych środowisku użytkowanych w miastach EEVs (Enhanced Environmentally Friendly Vehicles), wprowadzono znaczne ograniczenia

badanych emisji. Dla silników EEVs po raz pierwszy Regulamin ECE R-49 został zastąpiony przez dwa testy: stacjonarny test ESC (European Stationary Cycle) i niestacjonarny (przejściowy) test ETC (European Transient Cycle). Równolegle dla badań zadymienia S spalin silników typu EEVs został wprowadzony test ELR (European Load Response Test). Począwszy od roku 2000 (w latach 2000÷2001), wprowadzono przepisy EURO-III obowiązujące do roku 2005, w których również obowiązują testy ESC, ETC i ELR. Wprowadzenie EURO-IV przewiduje się w październiku roku 2005 a EURO-V w roku 2008. Obowiązujące w Polsce i EU wielkości ograniczeń testowych emisji spalin silników HDDE (łącznie z rodzajem testu i urzędem stanowiącym) podano w tabeli 1 zestawionej na podstawie danych literaturowych [1-10].

Tabela 1. Ograniczenia testowe emisji spalin silników HDDE obowiązujące w Polsce i EU
Table 1. Poland and EU Emission Standards for HDDE

Etap Test Cycle	Date.	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	S m ⁻¹	Source Comments
ECE R49 BN-84	1978 1984	14,0	3,50	18,0	-		ECE R49 BN-1984
ECE R- 49/1	1990	11,2	2,40	14,4	-		Dir88/77/ EEC
EURO-I; ECE R- 49/2 TA	1992.07	4,5	1,10	8,0	0,612 0,36		N _e < 85kW N _e > 85kW Dir91/542/EEC
EURO-I; ECE R- 49/2 COP	1993.10	4,9	1,23	9,0	0,68 0,40		N _e < 85kW N _e > 85kW Dir91/542
EURO-II ECE R- 49/2	1996.10	4,0	1,10	7,0	0,25		Dir91/542/EEC
EURO-II ECE R- 49/2	1998.10	4,0	1,10	7,0	0,15		Dir91/542/ EEC
EURO-II EEVs ETC/ESC/ ELR	1999.10	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15	Dir 1999/ 96 EC
EURO-III ETC/ESC/ ELR	2000.10	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13	0,8	Dir 2001/ 27 EC V < 75 dm ³
EURO- IV ETC/ESC/ ELR	2005.10	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	Dir 2001/ 27 EC
EURO- V ETC/ESC/ ELR	2008.10	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	Dir 2001/ 27EC

Ograniczenia emisji cząstek stałych PM w spalinach wynoszące początkowo 0,68 g/kWh dla silników mniejszych i 0,40 g/kWh dla silników większych (EURO-I) zostało zaostrożone do wielkości 0,13 g/kWh i 0,10 g/kWh obowiązujących do roku 2005 (EURO-III). Radykalne zmniejszenie emisji PM do wielkości 0,02 g/kWh obowiązuje obecnie w silnikach EEVs (EURO-II) oraz będzie obowiązywać w ramach przepisów EURO-IV (Tab.1).

3. Badania emisji cząstek stałych

Badania masy i struktury cząstek stałych wykonywane przy pomocy metod grawimetrycznych i analitycznych połączone są ściśle z badaniami nad inaczej definiowanym

i mierzonym przy pomocy metod optycznych i filtracyjnych zadymieniem spalin oraz badaniami składników gazowych wykonywanymi przy pomocy analizatorów o pracy ciągłej. Metody badań emisji cząstek stałych, w odróżnieniu od badań zadymienia czy składników gazowych, są bardziej skomplikowane, kosztowne oraz obarczone dużym rozrzutem wyników badań. Ze względu na założoną wysoką dokładność badań estymacji emisji problemowi temu poświęcono szczególną uwagę.

Do pomiarów i obliczeń masy cząstek stałych są stosowane dwie grupy metod:

- metody bezpośrednie,
- metody pośrednie.

Metody bezpośrednie (grawimetryczne) polegające na pomiarach masy cząstek emitowanych przez silnik i zebranych na specjalnych filtrach teflonowych są obecnie jedynymi uznanymi metodami dopuszczonymi do stosowania przez przepisy USA i UE oraz Międzynarodowe Normy ISO/8178.

Ze względu na pracochłonność i koszt pomiarów metody bezpośrednie do badań rozwojowych są stosowane sporadycznie i tylko przez najbogatsze ośrodki. W grupie metod bezpośrednich wyróżnia się dwie podstawowe metodyki:

- pełno przepływowa z tunelem mieszającym FFDS (Full Flow Dilution System),
- częściowo przepływowa z tunelem mieszającym PFDS (Partial Flow Dilution System).

Metoda bezpośrednia FFDS rozpowszechniła się głównie w USA, natomiast metoda bezpośrednia PFDS rozpowszechniła się ostatnio w Europie. Zaletą metod częściowo przepływowych PFDS jest większa mobilność aparatury i niższy koszt przy porównywalnej do metod FFDS dokładności pomiarów.

Z powyższych względów w Instytucie Lotnictwa zastosowano aparaturę pracującą według metody pośredniej z tunelem mieszającym PFDS przy pomocy zestawu urządzeń firmy AVL (SYSTEM SMART) oraz opracowano metodyki pomiarów dostosowane do badań atestacyjnych i rozwojowych [7].

Metody pośrednie (badawczo-obliczeniowe) za podstawę biorą pomiary parametrów wpływających na emisję cząstek stałych bez konieczności bezpośredniego pomiaru masy cząstek stałych. Rozwój metod pośrednich nastąpił po wprowadzeniu obowiązku pomiarów emisji cząstek stałych do przepisów urzędowych [1]. Metody pośrednie są łatwiejsze w stosowaniu i tańsze lecz obarczone większym błędem i z tego względu nie są obecnie dopuszczone przez przepisy urzędowe. Nadają się jednak do stosowania w badaniach porównawczych i rozwojowych.

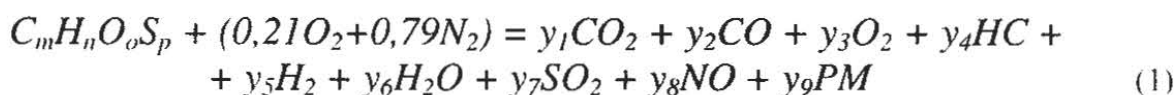
W Instytucie Lotnictwa postanowiono rozwinąć i wykorzystać własną metodę pośrednią badawczo-obliczeniową opartą na ogólnym równaniu bilansowym spalania. Metoda ta służąca określaniu i obliczaniu emisji cząstek stałych, nazwana została początkowo CAER1 następnie CAER2 ponieważ bazowała na oryginalnym systemie badawczo-obliczeniowym CAER (Computer Aided Emission Research – Komputerowe Wspomaganie Badań i Obliczeń Emisji) opisanym w pracach [5, 7, 9, 10]. Metoda obliczeń emisji cząstek stałych PM została rozwinięta i uzupełniona do niżej opisanego modelu COPART (COmputing Estimation PARTiculating Emission – Obliczeniowa Estymacja Emisji Cząstek Stałych) [10].

4. Ogólne bilansowe równanie spalania

Na podstawie literatury [2, 3, 4] oraz analiz przeprowadzonych w pracach [5, 7, 9, 10] sformułowano i dopracowano ogólny teoretyczny model rozszerzonego bilansowego równania spalania, który uwzględnia przebieg zjawisk zachodzących w silnikach spalinowych.

W zjawiskach tych decydującą rolę odgrywają rozgałęzione łańcuchowe reakcje spalania w powietrzu większości elementarnych składników paliw, w wyniku których powstają podstawowe składniki spalin silnikowych.

Model ten opisuje równanie, które w ujęciu statycznym bilansującym substraty i produkty reakcji spalania przy założeniu stechiometrycznego utleniania węgla, wodoru oraz siarki w paliwie ma postać:



w którym cząstki stałe PM są sumą:

$$PM = (C_{solid} + HC_{solid} + N_{2solid} + S_{solid}) \quad (2)$$

gdzie $y_1 + y_8$ są liczbą cząstek poszczególnych składników gazowych, a y_9 przy ostatnim członie równania (1) określającym cząstki stałe PM jest umowną liczbą cząstek poszczególnych składników wchodzących w skład cząstek stałych wywiązujących się w procesie spalania, pochodzących ze składników $(C_{solid} + HC_{solid} + N_{2solid} + S_{solid})$ wyszczególnionych w nawiasie równania (2). Równania te uwzględniają wydzielanie sadzy silnikowej C_{solid} , oraz cząstek stałych PM.

5. Model badawczo-obliczeniowy emisji cząstek stałych COPART

Na podstawie ogólnego modelu spalania opisanego równaniami (1) i (2) opracowano oryginalną metodę pośrednią oraz model badawczo-obliczeniowy estymacji emisji i algorytmy oraz procedury służące określaniu masy emisji cząstek stałych.

Do równania (2) wprowadzono bilans składników elementarnych (C, H, O, S) określany na podstawie równania (1). Następnie równanie (2) przekształcono, uproszczono, wyeliminowano małe wyższego rzędu oraz wprowadzono wielkości posiadające znaczący wpływ na emisję cząstek stałych mierzone podczas badań lub obliczane.

Wielkości te są następujące:

- masa emisji czystego węgla (lub sadza silnikowa), zadymienie, poziom węglowodorów i dwutlenku siarki w spalinach;
- zawartość siarki, węglowodorów aromatycznych i popiołu w składzie paliwa;
- zużycie paliwa i oleju smarującego silnik

Najistotniejszym składnikiem cząstek stałych PM (jak opisano w punkcie 2) jest sadza silnikowa C_{solid} , składająca się głównie z czystego węgla C i cięższych węglowodorów.

Masę emisji węgla C_{solid} , w spalinach określano z bilansu węgla w równaniu (1) lub w sposób uproszczony z pomiarów zadymienia spalin Z.

Przy obliczaniu masy emisji węgla C_{solid} z pomiarów zadymienia spalin Z, korzystano z uproszczonej zależności:

$$C_{solid} = k_Z \cdot Z \quad (3)$$

W której:

k_Z - współczynniki empiryczne

Z - liczba zadymienia (współczynnik absorpcji) m^{-1} ,

Po przeprowadzeniu powyższych operacji i wprowadzeniu równania (3) do równania (2) uzyskano ogólną zależność na empiryczny model badawczo-obliczeniowy do określania emisji cząstek stałych przy pomiarach emisji w poszczególnych fazach charakterystyk silnikowych lub testach emisji. Model ten zapisano w poniższej postaci (model COPART):

$$PM = k_C(eC) + k_{HC}(eHC) + k_S(S_F - S_{GAS}) + k_A(ASH_F) + k_{AROM}(AROM) + k_f(g_e) + k_{oil}(g_{oil}) + k_n(Const) \quad (4)$$

w którym:

PM- masa względna cząstek stałych w spalinach w g/kWh,

eC - masa emisji czystego węgla w g/kWh w składzie cząstek stałych PM(PT), obliczana z bilansu węgla lub z pomiarów zadymienia spalin wg zależności (3)

eHC - masa emisji węglowodorów HC w spalinach w g/kWh,

S_f - masa względna siarki w spalinach w g/kWh obliczona z masy siarki w paliwie,

S_{GAS} - masa względna siarki obliczona z masy siarki w SO₂ w spalinach w g/kWh,

ASH_F - łączna masa względna popiołu w paliwie odniesiona do masy spalin w g/kWh,

AROM_F - łączna masa względna węglowodorów aromatycznych w paliwie odniesiona do masy spalin w g/kWh,

g_e - zużycie jednostkowe paliwa w g/kWh,

g_{oil} - zużycie względne oleju smarującego w g/kWh,

k_C, k_{HC}, k_S, k_A, k_{AROM}, k_f, k_{oil}, k_n - współczynniki empiryczne,

Const - wartość stała zależna od masy względnej cząstek nieorganicznych i metali w spalinach w g/kWh. Przyjmowana wielkość od 0,2 do 0,8.

Obliczone metodą kolejnych przybliżeń na podstawie wyników badań emisji cząstek stałych PM (przy pomocy systemu SMART SAMPLER w testach ECE R49) wartości współczynników stałych modelu obliczeniowego COPART (4) wynoszą:

k_c = 0,45, k_{HC} = 0,08, k_S = 0,14, k_A = 0,02, k_{AROM} = 0,06, k_f = 0,04, k_{oil} = 0,02.

Metoda obliczeniowa według modelu COPART (4) została włączona do procedur komputerowego systemu badawczo-obliczeniowego CAER.

Wyniki uzyskane przy pomocy powyższej metody oznaczono COPART, uzyskane przy pomocy poprzednich metod oznaczano CAER 1 i CAER 2, natomiast wyniki badań bezpośrednich oznaczono skrótowo SMART.

Wyniki badań i obliczeń emisji PM według modelu (4) są podawane poniżej łącznie z wynikami badań i obliczeń innych składników emisji oraz parametrów pracy silnika.

6. Wyniki badań emisji spalin silnika T370

6.1. Badania emisji spalin przy modyfikacji silnika

Prace rozwojowe związane z kompleksową modernizacją silnika T370 z zapłonem samoczynnym oraz wszechstronne badania emisji przeprowadzono w celu spełnienia warunków EURO według Regulaminu ECE R49 (Tab.1). Początkowy stan tych badań został opisany w pracy [7]. Silnik T370 posiada moc nominalną 78 kW przy prędkości obrotowej 2400 min⁻¹ i objętości skokowej 4,56 l oraz stopniu sprężania 17,4. Wyposażony jest w turbosprężarkę B65 z chłodnicą powietrza doładowującego, pompę wtryskową BOSCHA typ 3000 oraz rozpylacze 5-o otworkowe o średnicach otworków 0,25 mm. Dopracowaniu poddano kształt komory spalania oraz układ paliwowy i wtryskiwacze. Przeprowadzono zmiany układów doładowania i chłodzenia powietrza doładowującego w połączeniu z regulacjami systemów sterowania pracą silnika. Podstawowym celem wprowadzanych w silniku zmian było zmniejszenie emisji PT i NO_x przez opracowanie konfiguracji systemu spalania oraz integracji osprzętu sprzyjającej powstaniu optymalnego zawirowania ładunku przy zmniejszeniu średnicy kropeł paliwa. Osiągnięto spadek poziomu emisji spełniający wymagania EUROII

Wyniki badań przyczyniły się również do udoskonalenia modelu COPART. W większości badań stosowano pomiary bezpośrednie emisji PM według procedur testu ECE R49 z zastosowaniem jednej pary filtrów lub 13-u par filtrów przy pomocy SYSTEMU SMART opisanego w punkcie 3 i w pracach [7, 10]. Obliczenia emisji PM wykonywano przy

pomocy modelu COPART (4) służącego do obliczania masy cząstek stałych PM opisanego w punkcie 3. Badania emisji CO, HC i NO_x wykonywano przy pomocy systemu analizatorów firmy SIGNAL opisanego w pracach [7, 10]. Najważniejsze wyniki badań emisji według Regulaminu ECE R49 kolejnych wprowadzanych zmian w silniku T370 przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań i obliczeń emisji spalin silnika T370 według testu ECE R49.
Table 2. Results of research and computation T370 engine of ECE R49 test emission..

File CAER	SIGNAL			BOSCH	SMART	CAER2	COPART
No	CO g/kWh	HC g/kWh	NO _x g/kWh	Z B	PM(PT) g/kWh	PM(PT) g/kWh	PM(PT) g/kWh
1	2	3	4	5	6	7	8
617	5.51	0.70	13.19	2.4		0.46	0.40
618	1.52	0.94	7.09	2.6	0.389	0.41	0.39
619	1.72	1.08	7.12	2.7	0.406	0.39	0.40
636	2.44	0.69	7.31	2.3	0.336	0.38	0.35
637	1.66	0.80	7.91	1.9	0.224	0.28	0.24
639	1.72	0.71	6.96	2.1	0.252	0.30	0.27
675	1.66	0.89	6.70	2.2	0.289	0.33	0.30
676	1.23	1.23	7.31	2.1	0.300	0.29	0.30
677	1.64	0.23	7.10	2.1	0.224	0.24	0.23
678	1.66	0.82	6.61	1.6	0.170	0.22	0.19
680	1.75	0.82	6.94	1.4	0.150	0.18	0.17

W tabeli 2 zestawiono wybrane najważniejsze wyniki badań kolejnych wersji silnika zapisanych w zbiorach systemu CAER. Porównano wyniki badań bezpośrednich (SMART) z wynikami obliczeń emisji PM (CAER2), (COPART) na tle wielkości zadymienia Z w skali BOSCHA oraz gazowych składników emisji (CO, HC i NO_x). Poziom emisji spalin silnika T370 spełniający wymagania EUROII podano w zbiorze 680 systemu CAER (tabela 2).

6. 1. Badania emisji spalin silnika zasilanego paliwem rzepakowym (ROME)

Przeprowadzono badania porównawcze poziomów emisji silnika T370 zasilanego kolejno olejem napędowym i paliwem rzepakowym w celu znalezienia związków pomiędzy ważnymi z punktu widzenia eksploatacyjnego emisjami testowymi i parametrami pracy silnika typu ZS, a poziomem emisji i składem spalin [10]. Właściwa ocena wpływu rodzaju paliwa na emisję toksyn, w tym cząstek stałych, wymaga przeprowadzenia specjalnych badań z zachowaniem odpowiednich warunków. Z tego powodu badania prowadzono na silniku T370 w konfiguracji według zbioru CAER 680 (por. tab.2) bez wprowadzania zmian w jego kompletacji i regulacji oraz przy zastosowaniu oleju smarującego VALCO CE15W/40. Silnik zasilano paliwami następujących typów:

- paliwo typu (CD) City Diesel o zawartości siarki <0.1 i obniżonej zawartości aromatów,
- paliwo typu (ROME) - Raps Oil Methyl Esters - Ester Metylowy Oleju Rzepakowego

Wybrane i poddane analizie parametry badanych paliw zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Podstawowe parametry badanych paliw
Table .3. Fuel research basic parameters

FUEL	DENS	VISC	CETAN	EV	SFUEL	ASH	AROM
Symbol	mg/cm ³	mm ² /sm	No	MJ/kg	% mass	ppm	% v/v
CD	812	3.12	47	42.9	<0.1	4	14.2
ROME	879	4.20	56	38	0.003	22	<10

Wyniki badań według Regulaminu ECE R49 silnika T370 zasilanego kolejno olejem napędowym (CD) lub paliwem rzepakowym (ROME) przedstawiono w tabeli 4. W tabeli tej

porównano wyniki badań bezpośrednich emisji (MEAS) wykonanych przy pomocy systemów SMART i SIGNAL z wynikami obliczeń PM (model COPART).

Tabela 4. Porównanie emisji wg ECE R49 silnika T370 zasilanego paliwem CD lub ROME
Table 4. Comparison of ECE R49 test emission T370 engine fueled CD or ROME

ECE R49		CD- MEAS	CD- COPART	ROME-MEAS	ROME- COPART
CO	g/kWh	1,56		1,29	
HC	g/kWh	1,26		0,89	
NOx	g/kWh	6,03		6,23	
PM	g/kWh	0,16	0,17	0,12	0,14

Interesujące są najważniejsze wnioski wynikające z analizy wyników badań zamieszczonych w tabelach 3 i 4, pomocne również przy dopracowaniu modelu COPART. Okazało się że wpływ badanych paliw na emisję jest zróżnicowany. Badany silnik wykazuje mniejsze emisje testowe tlenku węgla CO, węglowodorów HC i cząstek stałych PM, natomiast nieco większe emisje testowe tlenków azotu NOx przy zasilaniu paliwem ROME w porównaniu z zasilaniem paliwem CD. Wyraźne obniżenie emisji CO i HC w spalinach z paliwa ROME w porównaniu ze spalinami z paliwa CD można uzasadnić mniejszą zawartością węgla C i aromatów AROM w paliwie ROME niż w paliwie CD.

Niewielki wzrost emisji tlenków azotu NO_x w spalinach silnika zasilanego paliwem ROME można próbować wiązać z wyższą liczbą cetanową CETAN i lepkością DENS pomimo nieco niższej wartości energetycznej EV tego paliwa w porównaniu z paliwem CD. Zmniejszenie emisji PM i zadymienia spalin silnika zasilanego paliwem ROME wynika z niższej zawartością siarki SFUEL i aromatów AROM (pomimo nieco wyższej zawartości popiołu ASH) w paliwie ROME w porównaniu z paliwem CD. Wyniki obliczonych emisji PM według algorytmów modelu COPART (4) potwierdzają powyższe wnioski (por. tab.4).

W celu dokładniejszej analizy powyższych zależności przeprowadzono badania silnika o przy dwóch prędkościach obrotowych których wyniki zestawiono w tabeli 5

Tabela 5. Parametry pracy i emisji silnika T370 zasilanego paliwem CD lub ROME
Table . 5. Parameter and emission T370 engine fueled CD or ROME

Parameter			CD		ROME	
			1440 min ⁻¹	2400 min ⁻¹	1440 min ⁻¹	2400 min ⁻¹
Power	N _e	kW	56,13	77,67	56,13	77,67
Fuel consumption	g _e	g/kWh	218,1	263,0	247,0	296,0
Exhaust flow	G _{spz}	kg/h	329,6	552,3	327,2	548,1
Air/fuel relativity ratio	L	-	1,791	1,799	1,561	1,578
Combustion loss value	W _{ostr}	kJ/kg	43,5	47,1	15,4	32,7
CO emission	eCO	g/kWh	0,8	1,4	0,5	1,2
HC emission	eHC	g/kWh	0,763	1,097	0,509	1,109
Nox emission	eNO _x	g/kWh	6,59	4,06	6,97	4,11
PM emission	ePM	g/kWh	0,13	0,15	0,01	0,05
SO ₂ emission	eSO ₂	g/kWh	0,114	0,137	0,004	0,005

W tabeli 5 porównano wyniki badań wybranych parametrów pracy i emisji oraz składu spalin silnika T370 o mocy N_e = 77,67 kW pracującego przy dwóch prędkościach obrotowych: nominalnej n = 2400 min⁻¹ i momentu maksymalnego n = 1440 min⁻¹. Silnik zasilany był kolejno paliwem CD i paliwem ROME co pozwoliło rozszerzyć i pogłębić analizy i wnioski omówione powyżej na podstawie analizy wyników z tabel 3 i 4. Okazało się na podstawie

analizy wyników zamieszczonych w tabeli 5 że spalanie paliwa rzepakowego ROME w porównaniu ze spalaniem oleju napędowego CD w silniku T370 spowodowało:

- spadek wydatku spalin Q_{sprz} , współczynnika nadmiaru powietrza L i wartości opałowej straconej W_{ostr} , przy wzroście jednostkowego zużycia paliwa g_e ,
- zróżnicowany spadek emisji jednostkowych eCO i eHC (spadek eHC przy $n = 1440 \text{ min}^{-1}$),
- znaczny spadek emisji ePM , eSO_2 , przy obu prędkościach obrotowych silnika,
- niewielki wzrost emisji jednostkowej NO_x .

Zwiększenie prędkości obrotowej silnika z $n = 1440$ do 2400 min^{-1} spowodowało

- oczywisty wzrost jednostkowego zużycia paliwa g_e i rzeczywistego wydatku spalin G_{sprz} ,
- niewielki wzrost współczynnika nadmiaru powietrza L i wartości opałowej straconej W_{ostr} , (wzrost W_{ostr} większy przy spalaniu paliwa ROME),
- wzrost emisji jednostkowych eCO , eHC , ePM , eSO_2 , (wzrost ePM dużo większy dla paliwa ROME),
- spadek emisji jednostkowej NO_x (porównywalny dla paliw CD i ROME).

7. Wnioski

Opracowany w Instytucie Lotnictwa oryginalny model badawczo-obliczeniowy estymacji emisji cząstek stałych COPART, wyprowadzony z rozszerzonego równania bilansowego spalania, wykazał znaczną przydatność do pogłębionych analiz emisji spalin.

Badania wykazały możliwość znacznego obniżenia emisji spalin przez wprowadzenie modyfikacji konstrukcyjnych połączonych z integracją osprzętu oraz regulacją parametrów pracy silnika.

Istotnym czynnikiem wpływającym na zbadane zmiany emisji toksyn są różnice w analizowanych wielkościach wybranych parametrów paliw a zwłaszcza składu chemicznego.

Zaobserwowano znaczne i wielokierunkowe zmiany emisji silnika zasilanego paliwem rzepakowym w porównaniu z emisją silnika zasilanego olejem napędowym co utrudnia kompleksowe obniżanie emisji do poziomu wymaganego przez przepisy urzędowe.

Celowe jest znaczne przyspieszenie prac badawczo-rozwojowych silników z zapłonem samoczynnym i rozszerzenie badań emisji spalin spowodowane koniecznością ograniczenia emisji toksyn wymaganą przez zaostrzane stopniowo przepisy USA-EPA i EU-EURO.

Literatura

- [1] Strona Internetowa DIESEL NET - <http://www.dieselnet.com/>
- [2] Kowalewicz A.: *Fundamentals of combustion processes*. Science and Technology Publication House, Warsaw, 2000.
- [3] Merkisz J., Bielaczyc P., Pielecha J.: *Stan cieplny silnika spalinowego a emisja związków szkodliwych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. 9/2001.
- [4] Patterson D.J., Henein N.A.: *Emissions from Combustion Engines and Their Control*. Ann Arbor Science Publishers, Michigan, 1992.
- [5] Ekert K.: *CAER & GLOBEM - Two Systems for Emissions Research and Pollutant Summing*. International Symposium ESPACE AERONAUTICE ENVIRONNEMENT ATMOSPHERIQUE Tuluza, 1994.03.15-17. Cepadues-Editions ISBN2-85428-359-7/376.
- [6] Zabłocki M., Ekert K.: *Emisja nanocząstek nowym wyzwaniem dla silników z zapłonem samoczynnym*. Nanoparticulates Emission the New Challenge for the Diesel Engines. IV Sympozjum Naukowe EKODIESEL'98. Warszawa 1998.04.22÷24. Wydanie specjalne kwartalnika Prace Instytutu Lotnictwa ISSN 0509-6669.
- [7] Ekert K., Rusin M., Wasilewski Z., Jeż M.: *Zmniejszenie emisji cząstek stałych przy modernizacji silników z zapłonem samoczynnym*. Particulate Emission Reduction

During Modernisation of Diesel Engine. IV Sympozjum Naukowe EKODIESEL'98. Warszawa 1998.04.22÷24. Wydanie specjalne kwartalnika Prace Instytutu Lotnictwa.

- [8] Ekert K., Mazurkiewicz J., Rusin M.: *Measurments of Aromatics and Aldehydes Emissions from Direct Injection Diesel Engine*. Twenty Eight International Sympozjum on Combustion. University of Edynburg Scotland. 30th July – 4th August 2000.
- [9] Ekert K.: „Research and Computation of Atmosphere Pollution Generated by I.C. Engines”. 29th International Scientific Conference on Internal Combustion Engines. KONES 2003. September 14-17, 2003, Wisła, Poland.
- [10] Ekert K.: „Ogólna teoria estymacji emisji zanieczyszczeń z aplikacjami silnikowymi”. Kwartalnik naukowy PRACE INSTYTUTU LOTNICTWA nr 3/2003 (174).