

Jan CZERWINSKI*
Yan ZIMMERLI
Andreas MAYER

Doświadczenia w zakresie wyposażania eksploatowanych autobusów miejskich w filtry cząstek stałych

W artykule omówione zostały działania zmierzające do obniżenia emisji cząstek stałych przez autobusy komunikacji miejskiej eksploatowane w szwajcarskim mieście Biel-Bienne. W ramach 4-letniego projektu przeprowadzono badania: przydatności emulsji wodnej oleju napędowego (DWE), toksyczności spalin autobusów przed i po wyposażeniu w filtry cząstek stałych, stopnia regeneracji filtra wspomaganego dodatkami katalitycznymi w paliwie, a także badania filtra CRT z warstwą katalityczną oraz wpływu różnych olejów silnikowych.

Stwierdzono m.in., że jednoczesne zastosowanie emulsji DWE i filtra CRT powoduje wyraźne zmniejszenie emisji wszystkich toksycznych składników spalin, zastosowanie DWE jako paliwa wpływa korzystnie na regenerację DPF natomiast wpływ jakości oleju silnikowego na emisję cząstek stałych jest niejednoznaczny i wymaga dalszych badań. Stwierdzono także, że filtr zastosowany w autobusach klasy Euro 1 ma ograniczoną żywotność, a w autobusach klasy Euro 2 i 3 żywotność wynosi ok. 150 tys. km.

Słowa kluczowe: emisja cząstek stałych, filtry cząstek stałych, regeneracja filtra

Experiences about Retrofitting of City Busses with DPF's

In the paper the activities on reduction of Particle Matter emission of city busses in public transportation in City of Biel (Switzerland) were discussed. Following objectives were pursued in the 4 years project: clearing up of the usefulness of water-emulsion fuel, of exhaust gas emissions of busses before and after DPF retrofit, of efficiency of filter additive-supported regeneration, testing of coated CRT and preliminary tests with different lube oils.

As most important statements it can be pointed out that: water-fuel emulsion combined with CRT reduces significantly all emission components and supports the DPF regeneration but the influences of oil quality on the particle emissions need further investigations. It was also found out, that CRT doesn't work satisfactorily in the Euro 1 busses, while in Euro 2 and Euro 3 busses its cleaning periods were longer than 150 000 km.

Key words: Particulate Matter emission, Diesel Particle Filter (DPF), continuous regenerating trap

1. Streszczenie

Działania w kierunku wyposażania autobusów transportu publicznego w Szwajcarii w filtry cząstek stałych (DPF) zostały w ostatnich latach znacznie zintensyfikowane w związku ze wzmożoną troską o zdrowie mieszkańców i ochronę środowiska. Wyposażanie będących w eksploatacji autobusów w Biel-Bienne w kantonie Berno realizowane było przy wsparciu Federalnego Urzędu Ochrony Środowiska, Lasów i Krajobrazu (FOEFL) oraz Departamentu Transportu Publicznego Kantonu Berno.

W niektórych badaniach i obsłudze technicznej tych działań uczestniczyło Laboratorium Toksyczności Spalin Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Biel-Bienne. Uzupełniające badania podstawowe realizowane były przez Laboratorium podczas zajęć dydaktycznych uczelni na silniku VW TDI.

W ramach 4-letniego projektu z udziałem Przedsiębiorstwa Transportu Miejskiego w Biel-Bienne realizowano następujące zadania:

- określenie przydatności emulsji wodnej oleju napędowego (DWE),
- pomiary toksyczności spalin autobusów przed i po wyposażeniu w filtry cząstek stałych,

1. Abstract

The activities of retrofitting of busses in public transportation with Diesel Particle Filters (DPF's) in Switzerland increased in the last years due to the present concerns about public health and environment. The retrofitting activities in the Canton Bern, City of Biel were supported by the Swiss Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL) and the Office of Public Transportation of Canton Bern. The Laboratory for Exhaust Emissions Control (AFHB) of the University of Applied Sciences Biel-Bienne accompanied the activities with several technical services and research.

Following objectives were pursued with the Biel City Bus Transport Company (CBB) in the 4 years project:

- clearing up of the usefulness of water-emulsion fuel,
- exhaust gas measurements of busses before and after DPF retrofit,
- control of DPF's during the service time by means of data-logger monitoring,
- testing additive-supported regeneration on an Euro 1 -bus,
- testing a coated CRT on an Euro 1-bus,
- preliminary tests with different lube oils.

- kontrola filtrów DPF w czasie eksploatacji poprzez długookresową analizę parametrów pracy,
- badanie regeneracji filtra wspomaganej dodatkami katalitycznymi w paliwie w autobusie klasy emisyjnej Euro 1,
- badanie filtra CRT z warstwą katalityczną w autobusie klasy emisyjnej Euro 1,
- wstępne badania różnych olejów silnikowych pod względem emisyjnym.

Jako najważniejsze wnioski wynikające z pracy należy wymienić:

- zastosowanie jednocześnie emulsji DWE i filtra CRT powoduje wyraźne zmniejszenie emisji wszystkich toksycznych składników spalin, w tym redukcję liczby i masy cząstek stałych,
- zastosowanie DWE jako paliwa wpływa korzystnie na regenerację DPF,
- w przypadku nowoczesnych układów wtryskowych, zastosowanie DWE może wiązać się z trudnościami ze względu na:
 - niebezpieczeństwo rozkładu termicznego paliwa,
 - wpływ na czas i przebieg wtrysku paliwa oraz stopień EGR,
- autobusy klasy Euro 2 i 3 poprawnie współpracują z filtrem CRT, przebieg pojazdu pomiędzy koniecznym oczyszczaniem filtra wynosi ponad 150 tys. km,
- w przypadku autobusów klasy Euro 1, zwykły filtr CRT działa w sposób niezadowolający; filtr CRT z warstwą katalityczną platyny spełnia lepiej swoje zadanie, ale posiada ograniczoną trwałość (55 tys. km),
- mniejsza zawartość siarki i dodatków uszlachetniających w oleju silnikowym nie zawsze powoduje zmniejszenie emisji cząstek stałych,
- z uwagi na skomplikowany charakter wpływu jakości oleju silnikowego na emisję cząstek stałych, wyjaśnienie wątpliwości w tym zakresie wymaga dalszych badań.

2. Wprowadzenie

Ze względu na zaostrenie w ostatnich latach wymagań odnośnie czystości powietrza oraz wzrost społecznej świadomości w zakresie ochrony zdrowia, przedsiębiorstwa transportu publicznego, a w szczególności miejskiego, zmuszone są do ograniczenia emisji toksycznych składników spalin przez swój tabor.

Filtr cząstek stałych (DPF) jest bardzo skutecznym środkiem do usuwania ze spalin cząstek stałych (PM) i nanocząstek (NP < 1 µm), jednak jego zastosowanie powoduje wzrost kosztów eksploatacji oraz mogą występować trudności w regeneracji filtra. W Szwajcarii wykonano wiele badań dotyczących wyposażenia eksploatowanych maszyn budowlanych w filtry DPF [1], w tym opracowano testy skuteczności oraz kontroli filtrów w warunkach polowych [2]. Federalny Urząd Ochrony Środowiska, Lasów i Krajozbrazu Szwajcarii powołał zespół ekspertów w celu określenia możliwości wyposażenia eksploatowanych w Szwajcarii pojazdów typu *Heavy Duty* w filtry DPF [3].

Wydaje się, że w większości przypadków zastosowanie filtrów DPF jest technicznie możliwe, chociaż nie w kró-

Some supplementary basic research was performed by the AFHB during the didactic works of the University on a Volkswagen TDI engine.

As most important statements it can be pointed out:

- water emulsion fuel combined with CRT reduces significantly all emission components including particle mass and counts,
- water emulsion fuel supports the DPF regeneration,
- water emulsion fuel is problematic with modern injection systems:
 - danger of thermic decomposition
 - changed injection duration ? influence on EGR and on injection timing,
- busses Euro 2 and Euro 3 work without problems with CRT, the necessary CRT cleaning periods are longer than 150 000 km,
- CRT doesn't work satisfactorily on the Euro 1 busses, a Pt-coated CRT shows improvement with limited lifetime (55 000 km),
- reduced sulfur and lower content of the lube oil additive packages don't necessarily reduce the particle emission of the engine,
- the complex influences of oil quality on the particle emissions offer several open questions for further research.

2. Introduction

Due to more stringent air quality requirements in the last years and more consciousness about the health hazards the public transport companies, particularly those operating in cities, have to minimize the toxic exhaust emissions of their fleets.

The Diesel Particle Filter (DPF) is a very efficient measure to eliminate the particle matter (PM) and the nanoparticles (NP < 1 µm). Though it needs higher exploitation costs and can cause problems with the regeneration. In Switzerland much research concerning retrofitting of construction machines with DPF's has been done [1]. A quality test and field control of the DPF systems have been established [2]. The Federal Office of Environment, Forests and Landscape (FOEFL) charged the experts group to clear up the conditions of retrofitting all HD vehicles in Switzerland with DPF [3].

It appears, that the retrofitting is technically feasible in most cases, but not in a short time and with not negligible costs. In generally the introduction of this technology by the OEM's (original equipment manufacturers) is the best way to resolve the technical and commercial problems and to assure the service, maintenance and liability. In the meantime the retrofitting of the vehicles operating in the cities is an important and efficient way to minimize the pollution at short term. This retrofitting has to be done in steps, with carefully choosing the DPF-systems for the respective vehicle types and with public support.

Except of the Swiss national research activities [4, 5], there are worldwide numerous research activities about the particle taps and retrofitting of fleets [6, 7, 8, 9, 10, 11]. A very important role for a successful retrofitting play: the information of the users, the control systems of the DPF's,

kim czasie, a także wiąże się ze znacznymi kosztami. Bezspornie najlepiej jest jeśli filtry DPF są montowane już na etapie produkcji nowego pojazdu, co pozwala uniknąć wielu trudności technicznych oraz zapewnić odpowiednią obsługę, konserwację i gwarancję jakości filtrów. Jednocześnie instalowanie filtrów DPF w pojazdach już eksploatowanych jest skutecznym sposobem ograniczenia zanieczyszczenia powietrza w krótkim okresie czasu. Proces instalacji filtrów powinien być wspierany przez państwo oraz odbywać się etapami, przy starannym doborze systemów DPF, odpowiednio do typu pojazdu.

Liczne prace badawcze w zakresie filtrów cząstek stałych oraz wyposażenia w nie będących w eksploatacji pojazdów prowadzone są w Szwajcarii [4, 5], a także na całym świecie [6–11]. Bardzo ważną rolę w udanym zastosowaniu filtrów DPF w pojazdach będących w eksploatacji odgrywają następujące czynniki: informacja użytkowników, systemy sterowania i kontroli filtrów DPF, dostępność obsługi i części zamiennych oraz odpowiedzialność producentów filtrów DPF.

Z technicznego punktu widzenia wiadomo, że dokładnie taki sam filtr DPF może funkcjonować niezawodnie w danym typie pojazdu i jednocześnie ulec całkowitemu uszkodzeniu w innym typie. Powodem są odmienne warunki chemiczne, które wpływają na regenerację filtra oraz tworzenie produktów nieodwracalnie zanieczyszczających filtr. Z tego względu jest bardzo pożądane, aby podczas wyposażania pojazdów w filtry DPF dokonywać odpowiednich pomiarów kontrolnych oraz dysponować specjalistycznym doradztwem, tak jak to było w projekcie CBB.

3. Obiekty badawcze

3.1. Tabor autobusowy w Biel-Bienne

Stare trzyosiowe autobusy komunikacji miejskiej w Biel zostały zastąpione w roku 2002, krótko po Szwajcarskiej Wystawie Krajowej, przez 10 nowych, również trzyosiowych autobusów marki Mercedes, klasy emisyjnej Euro 3, fabrycznie wyposażonych w filtry CRT. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę taboru Przedsiębiorstwa Transportu Miejskiego w Biel w roku 2004.

W grupie pojazdów klasy Euro 1 skuteczne zastosowanie filtra CRT jest bardzo trudne, dlatego w tym przypadku badania prowadzono nad zastosowaniem innych wariantów filtrów DPF (JM+FBC i CRT z warstwą katalityczną) – patrz rozdział 5. Natomiast pojazdy klasy Euro 2 i 3 poprawnie współpracują z filtrami CRT.

3.2. Silniki

Charakterystykę jednostek napędowych autobusów uczestniczących w projekcie przedstawiono w tabeli 2.

Niektóre badania podstawowe wykonano na hamowni silnikowej:

the aftermarket service and liability of the DPF-manufacturers.

From the technical point of view it is known, that exactly the same DPF can be reliable on the one type of vehicle and can totally fail on the other type. The reasons are the different conditions of chemistry, which influences the regeneration and the production of the irreversible plugging of the filter.

In these conditions the accompaniment of the refitting of the vehicles with DPF's by the specialized control measurements and specialized consulting, like in the CBB-project, is very advantageous.

3. Test objects

3.1. Actual state of the Biel Bus Fleet

After the Swiss National Exposition 2002 the old 3-axle busses were replaced by Mercedes 3-axle busses with CRT as original equipment (10x Euro 3). The following Table 1 shows the actual state of the fleet (2004).

In the vehicle group (6x Euro 1) a successful application of CRT is very difficult. Therefore other DPF variants (JM+FBC and coated CRT) were studied (chap. 5). The groups (10x Euro 2) and (10x Euro 3) work without problems with CRT.

3.2. Engines

Engine data for the busses investigated in the project are presented in Table 2.

Some basic investigations were performed on the engine dynamometers:

- research of emulsion fuel according to VERT procedures, chap. 4 [12], on a Liebherr engine D914T (Table 3),
- research of engine out emissions with different lube oils, chap. 7 [17], on a VW TDI engine (Table 4).

4. Water emulsion fuel

The tests with 13 % water emulsion fuel were performed both: as basic emission investigation according to the VERT-procedure on the engine dynamometer, [12], and as a field test on a Mercedes Citaro bus [13, 14].

The emulsion fuel alone reduces the black smoke, Fig. 1. Due to the presence of increased amount of water vapour in the combustion the NO_x values are also reduced.

Tabela 1. Charakterystyka taboru Przedsiębiorstwa Transportu Miejskiego w Biel

Table 1. Bus fleet of the Biel public transportation company

| Poziom emisji / Emissions level | Liczba pojazdów / Number of vehicles | Marka pojazdu / Make of vehicle | Liczba osi / Axles | Rok produkcji / Year of manufacture |
|------------------------------------|---|------------------------------------|-----------------------|--|
| Euro 1 | 6 | Mercedes 0405N | 2 | 1992/93 |
| Euro 2 | 10 | Mercedes Citaro 0530N | 2 | 2000 |
| Euro 2 | 2 | Mercedes Citaro 0530GN | 3 | 2000 |
| Euro 3 | 10 | Mercedes Citaro 0530GN | 3 | 2002 |

Tabela 2. Dane techniczne silnika dwuosioowych autobusów klasy Euro 1 (6 pojazdów), dwuosioowych autobusów klasy Euro 2 (10 pojazdów), trzyosioowych autobusów klasy Euro 2 (2 pojazdy) i Euro 3 (10 pojazdów)

Table 2. Group 6x Euro 1 (2 axles), 10x Euro 2 (2 axles), 2x Euro 2 and 10x Euro 3 (3 axles)

| Grupa / Group | 6 x Euro 1 (2 osie) / 6 x Euro 1 (2 axles) | 10 x Euro 2 (2 osie) / 10 x Euro 2 (2 axles) | 2 x Euro 2 i 10 x Euro 3 (3 osie) / 2 x Euro 2 i 10 x Euro 3 (3 axles) |
|---|---|---|--|
| Oznaczenie / Designation | Mercedes O405N OM447ha | Mercedes Citaro OM906hLA | Mercedes Citaro OM457hLA |
| System pracy / Working cycle | 4-suw, zapłon samoczynny, wtrysk bezpośredni / 4-stroke engine diesel direct injection | 4-suw, zapłon samoczynny, wtrysk bezpośredni / 4-stroke engine diesel direct injection | 4-suw, zapłon samoczynny, wtrysk bezppośredni / 4-stroke engine diesel direct injection |
| Liczba cylindrów / Number of cylinders | 6 | 6 | 6 |
| Układ cylindrów / Arrangement | rzędowy, poziomy / in-line engine, horizontal | rzędowy, poziomy / in-line engine, horizontal | rzędowy / in-line engine |
| Średnica cylindra / Bore | 128 mm | 102 mm | 128 |
| Skok tłoka / Stroke | 155 mm | 130 mm | 155 |
| Objętość skokowa / Displacement | 11 965 cm ³ | 6370 cm ³ | 11 970 cm ³ |
| Stopień sprężania / Compression ratio | 16,5 | 17,4 | 17,25 |
| Maksymalna prędkość obrotowa / Maximum engine speed | 2200 obr/min | 2300 obr/min | 2000 obr/min |
| Maksymalny moment obrotowy wg 88/195/EWG / Engine torque acc. to 88/195/EWG | 184 kW przy 2200 obr/min | 205 kW przy 2300 obr/min | 220 kW przy 2000 obr/min |
| Moc maksymalna wg 88/195/EWG / Engine power acc. to 88/195/EWG | 805 N·m przy 1000-1600 obr/min | 1100 N·m przy 1300 obr/min | 1250 Nm przy 1100 obr/min |
| Liczba głowic cylindrowych / Number of cylinders heads | 6 | 1 | 6 |
| Rodzaj tulei cylindrowej / Cylinder liner | mokra / wet | brak / none | mokra / wet |
| Układ smarowania / Lubrication | ciśnieniowy / pressure lubrication system | ciśnieniowy / pressure lubrication system | ciśnieniowy / pressure lubrication system |
| Filtr oleju / Oil filter | przepływowy w kanale g łównym / low filter in the main stream | stały o długim okresie użytkowania / long-term oil filters, standing | stały, z wymiennym wkładem / standing, with change cartridge |
| Filtr powietrza / Air filter | suchy ze wskaźnikiem ciśnienia / dry filter with under pressure display | suchy ze wskaźnikiem ciśnienia / dry filter with under pressure display | suchy ze wskaźnikiem ciśnienia / dry filter with under pressure display |
| Układ chłodzenia / Cooling system | cieczowy z pompą odśrodkową / water circulation by centrifugal pump | cieczowy z pompą / water circulation by coolant pump | cieczowy z pompą / water circulation by coolant pump |
| Wymagana temperatura chłodzenia / Cooling index temperature | 70-95°C | 70-95°C | - |
| Układ chłodzenia oleju / Oil-cooled system | płytkowe chłodnice oleju / disk oil coolers | 8 płytkowych chłodnic oleju / 8 disk oil coolers | - |

- badania emulsji paliwowo-wodnej według procedury VERT (rozdz. 5) [12] na silniku Liebherr typu D914T (tab. 3),
- badania emisji przy różnych olejach silnikowych (rozdz. 7) na silniku VW TDI (tab. 4).

A combination of water emulsion fuel with a particle filter is a very interesting solution to lower NO_x and PM. Table 5 shows the reduction rates of all components in the VERT-4 Points-Test on a Liebherr engine (D914T) with combination of emulsion fuel and CRT. The CRT, which has also a catalytic oxidation activity reduces strongly CO and HC. The

Tabela 3. Dane techniczne silnika D914 T
Table 3. D914 T engine specifications

| | |
|---|--|
| Producent / <i>Manufacturer</i> | Liebherr Machines Bulle S.A., Bulle / Fribourg |
| Typ / <i>Type</i> | D914 T |
| Objętość skokowa / <i>Cylinder volume</i> | 6,11 dm ³ |
| Znamionowa prędkość obrotowa / <i>Rated RPM</i> | 2000 min ⁻¹ |
| Moc znamionowa / <i>Rated power</i> | 105 kW |
| Układ cylindrów / <i>Arrangement</i> | 4 cylindry rzędowo / 4 cylinder in-line |
| System spalania / <i>Combustion process</i> | wtrysk bezpośredni / direct injection |
| Pompa wtryskowa / <i>Injection pump</i> | Bosch, rzędowa / Bosch in-line pump |
| System doładowania / <i>Supercharging</i> | turbosprężarka z chłodnicą powietrza / <i>turbocharger without inter-cooling</i> |
| Układ oczyszczania spalin / <i>Emission control</i> | brak / none so far |
| Rok konstrukcji / <i>Development period</i> | 1986 |
| Okres stosowania / <i>Field of application</i> | od roku 1988 / since 1988 |

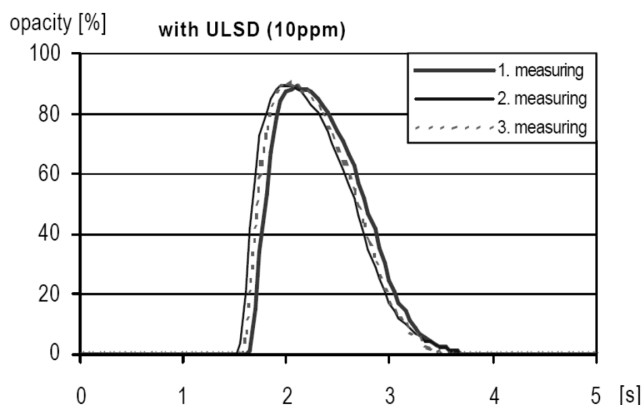
Tabela 4. Dane techniczne silnika VW AJM
Table 4. VW AJM engine specifications

| | |
|---|--|
| Producent / <i>Manufacturer</i> | Volkswagen |
| Typ / <i>Type</i> | AJM |
| Objętość skokowa / <i>Cylinder volume</i> | 1 896 cm ³ |
| Znamionowa prędkość obrotowa / <i>Rated RPM</i> | 2000 min ⁻¹ |
| Moc znamionowa / <i>Rated power</i> | 105 kW |
| Układ cylindrów / <i>Arrangement</i> | 4 cylindry rzędowo / 4 cylinder in-line |
| Stopień sprężania / <i>Compression ratio</i> | 18 |
| Pojemność układu smarowania / <i>Oil capacity</i> | 4,5 dm ³ |
| System spalania / <i>Combustion process</i> | wtrysk bezpośredni / direct injection |
| Pompa wtryskowa / <i>Injection pump</i> | pompowtryskiwacze / unit injectors |
| System doładowania / <i>Supercharging system</i> | turbosprężarka o zmiennej geometrii turbiny / <i>turbocharger with vario turbine</i> |
| Układ oczyszczania spalin / <i>Emission control</i> | utleniający reaktor katalityczny / oxidation catalyst |
| Model roku / <i>Model year</i> | 1999 |

4. Emulsja wodna oleju napędowego

Badania zastosowania emulsji wodnej oleju napędowego (DWE), zawierającej 13% wody obejmowały: podstawowe pomiary emisji na hamowni silnikowej według procedury VERT [12] oraz badania drogowe autobusu Mercedes Citaro [13, 14]. Stwierdzono, że zastosowanie emulsji jako paliwa powoduje obniżenie zaczernienia spalin (rys. 1), a obecność podczas spalania większej ilości pary wodnej zmniejsza ilość NO_x.

Równoczesne zastosowanie emulsji oraz filtra cząstek stałych jest skutecznym sposobem zmniejszenia emisji NO_x.

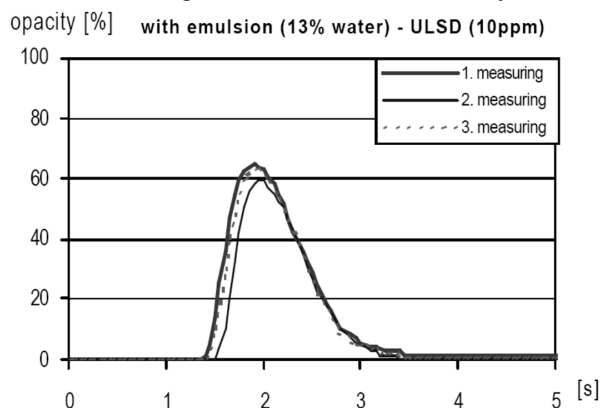


Rys. 1. Zaczernienie spalin podczas swobodnego przyspieszania; silnik Liebherr D914 T bez filtra cząstek stałych

Fig. 1. Opacity during the free acceleration without particle trap, engine: Liebherr D914 T

particle mass filtration efficiency is not the right parameter to describe the filter quality, because it is overlapped by the condensation effects of sulfates after the filter. The best qualification of filtration efficiency of solid particles offer the SMPS particle count concentrations, or equivalent parameters, like PAS, DC, EC-analysis, or ELPI.

Fig. 2 shows the integrated numbers of particles in the size spectrum 20-200 nm with/without emulsion fuel and with/without CRT. It is to see, that the emulsion fuel doesn't influence the nanoparticle emissions. In contrary the CRT



i PM. W tabeli 5 przedstawiono wskaźniki redukcji emisji toksycznych składników spalin w czterofazowym teście VERT silnika Liebherr D914 T zasilanego emulsją i wyposażonego w CRT. Filtr CRT posiada zdolności utleniające i wyraźnie obniża emisję CO i HC.

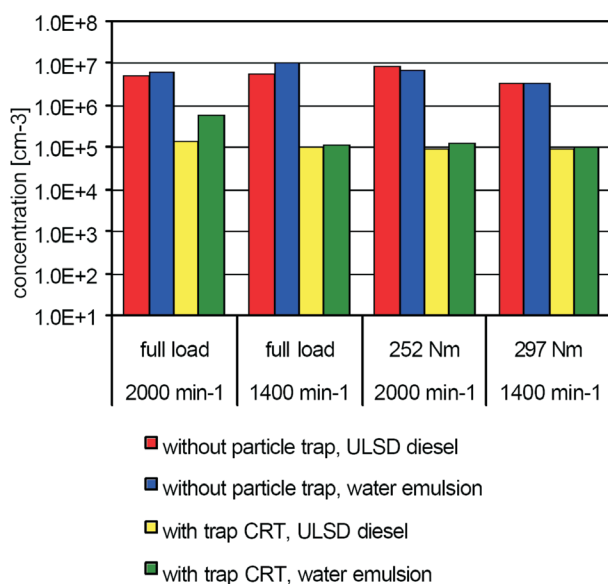
Masowa sprawność filtracji cząstek nie jest odpowiednim parametrem do opisu skuteczności filtra, ponieważ nakłada się na nią zjawisko kondensacji siarczanów za filtrem. Najlepszym sposobem opisu skuteczności filtracji cząstek stałych zapewnia SMPS – stężenie cząstek jako liczba cząstek o określonych wymiarach w danej objętości [$1/\text{cm}^3$] lub równoważne parametry, takie jak PAS, DC, analiza EC albo ELPI.

Na rysunku 2 przedstawiono sumaryczną ilość cząstek o wymiarach w zakresie 20-200 nm w jednostce objętości spa-

Tabela 5. Zmniejszenie emisji przy zastosowaniu emulsji DWE zawierającej 13% wody i filtra CRT; pierwotny poziom emisji dla silnika bez filtra zasilanego paliwem ULSD

Table 5. Reduction of emission values ULSD w/o DPF; emulsion 13% water with CRT

| Punkt pracy silnika / operating point | CO [%] | HC _{FID} [%] | NO _x [%] | PM [%] |
|---|--------|-----------------------|---------------------|--------|
| 2000 obr/min dawka maksymalna / full charge | 100,0 | 57,1 | 15,1 | 55,6 |
| 1400 obr/min dawka maksymalna / full charge | 100,0 | 48,0 | 13,0 | 84,6 |
| 2000 obr/min 252 N·m | 100,0 | 49,2 | 12,6 | 82,5 |
| 1400 obr/min 297 N·m | 100,0 | 25,4 | 9,4 | 60,1 |
| średnia / mean | 100,0 | 44,9 | 12,5 | 70,7 |



Rys. 2. Sumaryczna liczba cząstek o wymiarach w zakresie 20-200 nm w jednostce objętości spalin dla silnika z/bez filtra CRT oraz zasilanego olejem napędowym i 13% emulsją DWE

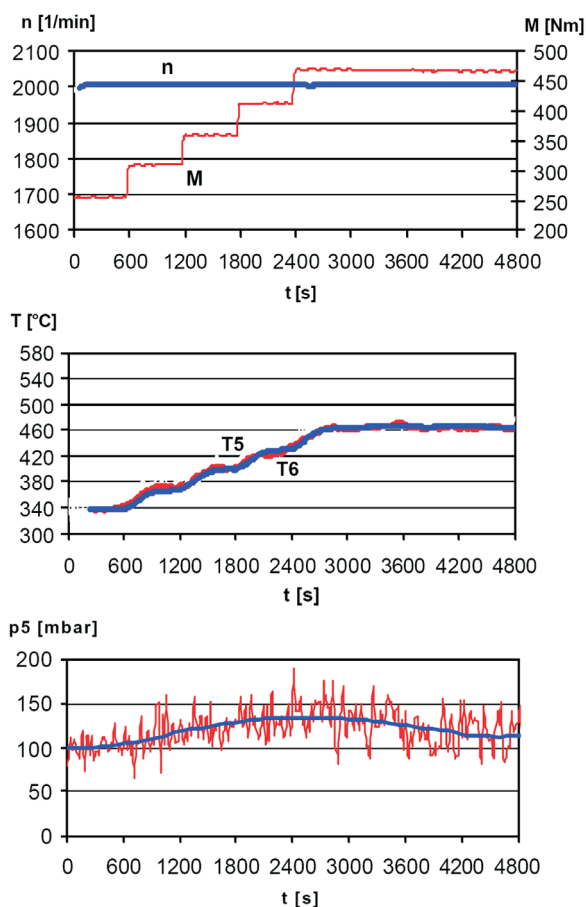
Fig. 2. Integrated numbers of particles in the size spectrum 20-200 nm with/without CRT particle trap & 13% water emulsion

lin dla silnika z/bez filtra CRT oraz zasilanego olejem napędowym/emulsją DWE. Jak widać, zastosowanie emulsji nie wpływa na emisję cząstek. Z kolei filtr CRT wykazuje wysoką skuteczność filtracji, obniżając stężenie cząstek o prawie dwa rzędy wielkości.

Emulsja DWE obniża nieznacznie temperaturę spalin (maksymalnie o około 30°C), niemniej jednak ze względu

shows a good filtration efficiency reducing the nanoparticles by two ranges of magnitude.

The water emulsion reduces slightly the exhaust gas temperatures (until about 30°C), but nevertheless due to the physico-chemical activity of water vapor it promotes the CRT-regeneration. Fig. 3 represents the most important parameters during the regeneration attempt with stepwise increased torque and temperature on an engine dynamometer.



Rys. 3. Parametry pracy podczas regeneracji filtra CRT-HJS przy zasilaniu silnika emulsją zawierającą 13% wody

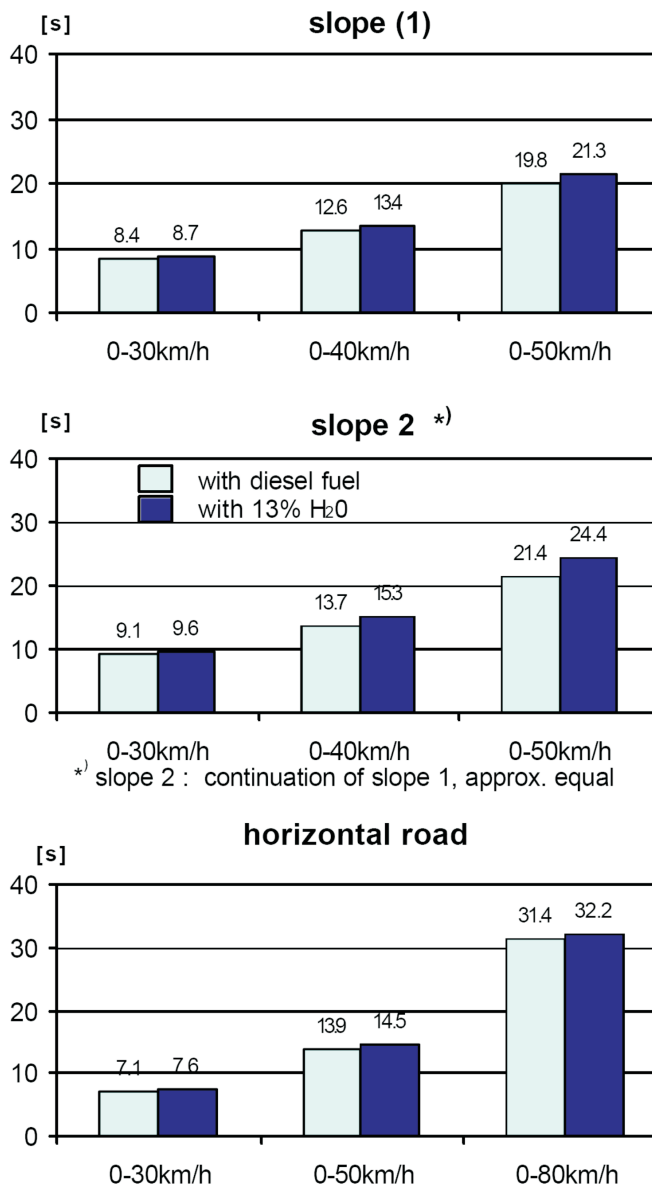
Fig. 3. Regeneration attempt with 13% water emulsion, particle filter CRT-HJS

na fizykochemiczną aktywność pary wodnej, zastosowanie emulsji wpływa korzystnie na proces regeneracji filtra CRT. Na rysunku 3 przedstawiono najważniejsze parametry zarejestrowane podczas badania regeneracji filtra na hamowni silnikowej, przy stopniowo wzrastającym momencie obrotowym i temperaturze.

Podczas badań nie zmieniano regulacji układu wtryskowego i zastosowanie emulsji zawierającej 13% wody powodowało obniżenie maksymalnego momentu obrotowego o 13%. W przypadku autobusów ważną kwestią było to, czy pogorszony przebieg momentu obrotowego jest akceptowalny w warunkach ruchu w Biel-Bienne. Aby to sprawdzić wykonano próby przyspieszania (rys. 4) na drodze płaskiej i pochyłej przy zastosowaniu emulsji i paliwa konwencjonalnego, nie stwierdzono jednak znaczących różnic w czasach przyspieszania dla obu paliw. Również w toku dalszego stosowania emulsji, kierowcy autobusów nie sygnalizowali zmniejszenia mocy silnika.

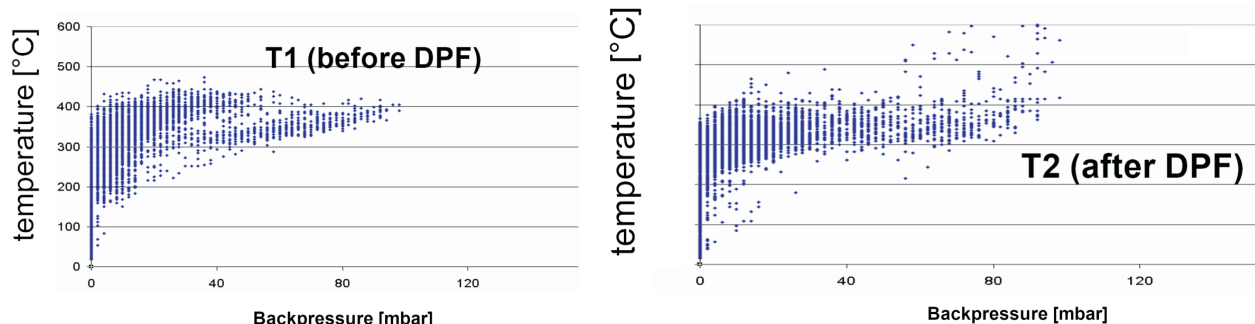
W okresie zimowym na przełomie 2001 i 2002 roku pojazd zasilany emulsją DWE przejechał około: 3 tys. km bez filtra, a następnie około 6 tys. km z zainstalowanym filtrem CRT. Proces regeneracji ciągle funkcjonował bardzo dobrze – nie stwierdzano wzrostu przeciwcisnienia, a stochastycznie wyższe temperatury spalin za filtrem wskazywały na trwającą regenerację (rys. 5).

Silnik Mercedes Citaro (OM906hLA) jest wyposażony w sterowany elektronicznie pompowtryskiwaczowy układ wtryskowy. Czas trwania wtrysku jest miarą rozwijanego momentu obrotowego a parametry wtrysku oraz EGR są dobierane na podstawie mapy moment obrotowy – prędkość obrotowa. Zastosowanie paliwa o niższej wartości opałowej powoduje zatem zmianę zależności moment obrotowy – czas trwania wtrysku a w efekcie także inne parametry sterowania silnikiem (EDC). To z kolei może mieć wpływ na ilość NO_x z uwagi na zmniejszony stopień EGR i/lub zwiększenie wyprzedzenia wtrysku. Dodatkowym zagrożeniem jest termiczny roz-



Rys. 4. Porównanie czasów przyspieszania autobusu Mercedes Citaro z silnikiem OM906hLA zasilanego olejem napędowym Greenergy i emulsją zawierającą 13% wody

Fig. 4. Acceleration time with CITARO (OM906hLA) – Bus Nr. 120 with Greenergy diesel fuel and 13% water emulsion



Rys. 5. Korelacja przeciwcisnienia i temperatury przed (T1) i za (T2) filtrem CRT w układzie wylotowym autobusu Mercedes Citaro zasilanego emulsją zawierającą 13% wody; częstość próbkowania 15 s (pomiarzy prowadzono w dniach 14-19.03.2002)

Fig. 5. Correlation of backpressure and temperatures (T1, T2) Bus Citaro 120, sampling rate 15 s (14-19.03.2002) with CRT and 13% water emulsion

kład emulsji z uwagi na wysoką temperaturę paliwa w układzie. W przypadku przedsiębiorstwa komunikacji publicznej poważny problem logistyczny stanowi ograniczona trwałość emulsji (około 3 miesiące) oraz konieczność używania jednego typu paliwa do wszystkich pojazdów.

5. Badania drogowe autobusów oraz długookresowa analiza parametrów pracy

5.1. Aparatura pomiarowa

Laboratorium Toksyczności spalin Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Biel-Bienne zostało upoważnione przez Federalny Urząd Ochrony Środowiska Szwajcarii do prowadzenia badań polowych maszyn i pojazdów, które zostały wyposażone w filtry cząstek stałych. Do pomiaru emisji gazowych składników spalin stosowany jest przenośny analizator typu rbr-ecom-KD, który umożliwia pomiar następujących składników:

- CO, CO₂ – cele elektrochemiczne (3 F/F CiTicel)
- HC – czujnik na podczerwień (HC 6)
- NO – cela elektrochemiczna (3 NF/F CiTicel)
- NO₂ – cela elektrochemiczna (3 NDH CiTicel)
- O₂ – cela elektrochemiczna (C/N CiTicel)

Zadymienie spalin jest mierzone podczas swobodnego przyspieszania dymomierzem AVL Dismoke 435. Pomiar ten jest najważniejszym kryterium poprawnej pracy i skuteczności filtra DPF (wartość maksymalna zadymienia < 5%). W miarę możliwości mierzone jest również zadymienie metodą filtracyjną w jednostkach skali Boscha przy zastosowaniu dymomierza AVL 407 Smoke Tester.

W przypadku pojazdów drogowych, zamiana tłumika na filtr DPF nie może powodować wzrostu emisji hałasu (według zarządzenia Administracji Drogowej Szwajcarii nr EJPD8/1990). Spełnienie tego wymagania jest sprawdzane przez pomiar poziomu hałasu sonometrem typu Brüel & Kjaer 1613.

5.2. Pomiary hałasu i toksyczności spalin

Sposób pomiaru oraz wybrane wyniki pomiarów poziomu hałasu pojazdu na postoju przedstawiono na rysunku 6. W przypadku obu autobusów (nr 113 i 124) zainstalowanie filtra CRT spowodowało obniżenie emisji hałasu. W ciągu całych badań hałasu potwierdzono, że zamiana konwencjonalnego tłumika na filtr DPF nie wywołuje w tym zakresie negatywnych skutków.

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie stężeń składników gazowych w spalinach autobusów z i bez filtrów CRT. Odnosnie wyników pomiarów podczas biegu jałowego można stwierdzić, że filtr CRT z uwagi na katalityczne właściwości utleniające, obniża stężenie CO w spalinach. Natomiast przy tak niskiej jak w tych warunkach temperaturze spalin, nie wpływa znacząco na ilość HC i NO_x.

Należy zaznaczyć, że wzrost stężenia HC w spalinach grupy autobusów dwuosiowych klasy Euro 2 z filtrami CRT spowodowany był niekiedy różnymi czynnikami. Na przykład badania emisji autobusu nr 126 wykonane były na krótko przed wymianą turbosprężarki z powodu przecieków oleju. Po uruchomieniu silnika z nową turbosprężarką zauważono, że pewna ilość oleju pozostała jeszcze w chłodnicy po-

On the bus it was the question, if the reduced maximum torque characteristics of the engine can be accepted in the city traffic of Biel? (Since there were no changes on the injection system with 13% water results a 13% lower full load torque.) Some full accelerations were performed on the horizontal road and on the slope with both fuels, Fig. 4. From this test no significant differences of acceleration time were remarked. In the further use of vehicle there were no complaints of drivers about the reduced engine power.

In the winter 2001/02 the vehicle absolved about 3,000 km with emulsion fuel without DPF and after about 6,000 km with CRT. The continuous regeneration worked very well – no increase of the backpressure and stochastically higher temperatures after the trap indicate the regenerations, Fig. 5.

The Citaro engine (OM906hLA) is equipped with an electronically controlled unit pump injection system. The injection duration is a measure of engine torque and due to the mapping; torque – speed the injection timing and EGR are regulated. The introduction of fuel with changed heat value, changes the relationship: torque – injection duration and finally changes the parameters of EDC. This can have contrary influences on NO_x due to reduced EGR and/or advanced start of injection. Another risk is a possibility of thermal decomposition of the emulsion due to high temperatures of the fuel.

For the Public Transportation Company the limited life time of the emulsion (approx. 3 months) and the necessity of having one fuel for all vehicles can create a serious logistic problem.

5. Field control of the fleet & datalogger screening

5.1. Measuring equipment

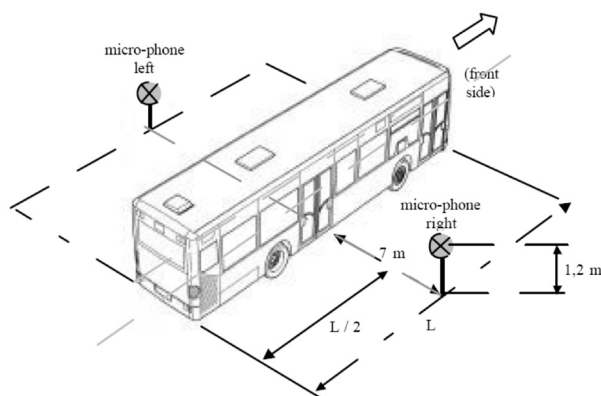
The Laboratory for Exhaust Emissions Control of the University of Applied Sciences Biel-Bienne, Switzerland (AFHB) is mandated by the Federal Office for Environment (FOEFL) to perform the field control of machines and vehicles, which are retrofitted with the DPF's. For the control of gaseous emissions an rbr-ecom-KD portable exhaust gas analyzer is used. Following components are measured:

- CO, CO₂ – electrochemical cells (3 F/F CiTicel)
- HCIR – infrared detector (HC 6)
- NO – electrochemical cel (3 NF/F CiTicel)
- NO₂ – electrochemical cel (3 NDH CiTicel)
- O₂ – electrochemical cel (C/N CiTicel)

The smoke opacity is measured during the free acceleration with the AVL opacimeter Dismoke 435. This measurement is the most important criterion to check the condition and the efficiency of the DPF (opacity peak < 5 %).

If possible the Bosch Smoke Number (Filter Smoke Number) is measured at the full load (or high load) operation with the AVL 407 Smoke Tester.

For the on-road vehicles the replacing of the silencer by the DPF must not provoke any increase of the noise emission (according to the ordinance of the Swiss Road Authority EJPD8 / 1990). This is controlled by means of the sound level measurement (sound level meter Brüel & Kjaer, type 1613).



5.2. Noise & exhaust gas measurements

The measuring procedure and some results of the sound level at standstill of the vehicle are depicted in Figure 6. The refitting of the bus No. 124 with the CRT showed a lower sound level, this is also the case for bus No. 113.

It is generally confirmed in these investigations, that the replacing of silencer by DPF doesn't create any problems of noise.

Fig. 7 gives the graphical comparisons of exhaust gas components, with and without CRT. It can be stated, regarding the results at low and high idling, that in general CRT lowers the CO-values due to presence of oxidation catalyst and CRT has no special effects on HC and NO_x in this range of low exhaust gas temperature.

| | Prędkość obrotowa silnika [obr/min] / Engine speed [rpm] | Poziom natężenia dźwięku z lewej strony pojazdu; bez filtra DPF / w/o DPF (*) dB-left | Poziom natężenia dźwięku z prawej strony pojazdu; bez filtra DPF / dB-right | Poziom natężenia dźwięku z lewej strony pojazdu; z filtrem DPF / with DPF dB-left | Poziom natężenia dźwięku z prawej strony pojazdu; z filtrem DPF / dB-right |
|----------------------|--|---|---|---|--|
| EURO 1 Bus n° 113 | 600 | 62 | 61 | 60,0 | 58 |
| | 1000 | 69 | 66 | 67,3 | 65 |
| | 1500 | 73 | 71 | 71,1 | 69 |
| | 2000 | 77 | 75 | 77,3 | 74 |
| EURO 2 Bus n° 124 | 600 | 63 | 65 | 62,0 | 62 |
| | 1000 | 66 | 70 | 66,0 | 65 |
| | 1500 | 74 | 78 | 69,0 | 69 |
| | 1700 | 77 | 81 | 71,0 | 71 |

Rys. 6. Wyniki pomiaru hałasu na postoju; rodzaj paliwa – olej napędowy Greenergy

Fig. 6. Noise measurement at standstill Greenergy fuel

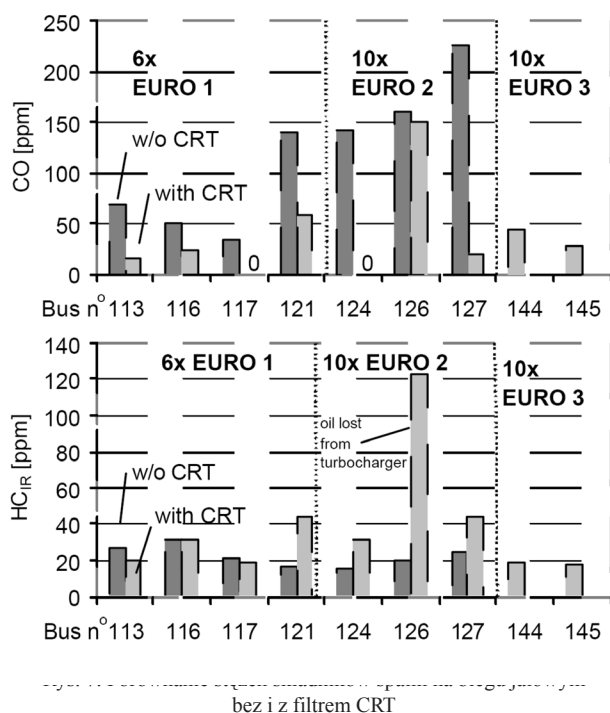


Fig. 7. Comparison of emission at idling with and without CRT

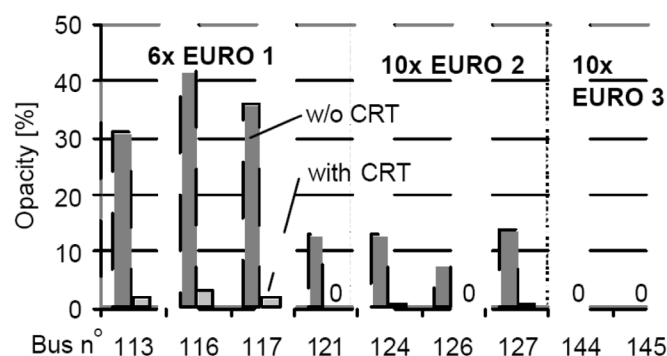
Some tendencies of increased HC with CRT by the group Euro 2 two-axes are caused by other reasons. An example is the bus No. 126, where the measurement was performed shortly before the replacement of the turbocharger, which lost oil. After starting the engine with the new turbocharger it was remarked, that there was still a certain quantity of lube oil in the intercooler, which passed through the engine, but fortunately it didn't damage the CRT. The results of opacity at free acceleration show always an efficient elimination of the black smoke by the CRT, Fig. 8.

5.3. Datalogger screening

The objective of the datalogger screening is to see the behaviour of regenerations and the state of charge, or ageing of the DPF.

The mostly used evaluation rate was 15 s with reading of the maximum values of p & T per interval.

Fig. 9 shows the results for bus No. 124 (group 10x Euro 2) represented as correlations between backpressure and temperatures before/after trap during the operating period with CRT. The trouble-free work of CRT on this vehicle exceeds 150 000 km until the moment of this report. Due to the irreversible plugging of the trap with ashes the maximum val-



kys. 8. Łaczenie spalin podczas swobodnego przyspieszania bez i z filtrem CRT

Fig. 8. Opacity at free acceleration with and without CRT

wietrza doładowywanego. Olej ten mimo że dostał się do silnika, a następnie filtra CRT, na szczęście nie spowodował jego uszkodzenia. Wartości zadymienia podczas swobodnego przyspieszania wskazują na skuteczną eliminację dymienia przez filtr CRT (rys. 8).

5.3. Długookresowa analiza parametrów pracy

Celem długookresowego monitorowania parametrów pracy było sprawdzenie przebiegu regeneracji, stopnia zanieczyszczenia oraz przebiegu starzenia filtra DPF w długim okresie jego użytkowania. Czas pomiaru podczas tych badań wynosił najczęściej 15 s, podczas których wyznaczano maksymalne wartości ciśnienia i temperatury.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność przeciwi-ciśnienia i temperatury spalin autobusu numer 124 z grupy Euro 2 w czasie użytkowania filtra CRT. Do czasu pisania niniejszego artykułu autobus z filtrem CRT przejechał ponad 150 tys. km i filtr pracował nadal bezawaryjnie. Jedynie z uwagi na nieodwracalne zanieczyszczenie filtra popiołem, w wymienionym okresie eksploatacji przeciwi-ciśnienie w układzie wylotowym wzrosło z około 160 mbar do 225 mbar.

Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wzrost średniego przeciwi-ciśnienia w układzie wylotowym różnych autobusów w funkcji przebytego dystansu. Stwierdzono, że zachodzący proces zanieczyszczenia filtrów popiołem nie stwarza większych problemów i jest zgodny z wcześniejszymi przewidywaniami. W przypadku grupy najnowszych autobusów trzyosiowych, fabrycznie wyposażonych w filtry CRT, nie stwierdzono natomiast żadnego zanieczyszczenia popiołem po przebiegu 90 tys. km.

6. Badania filtrów DPF w autobusach klasy Euro 1

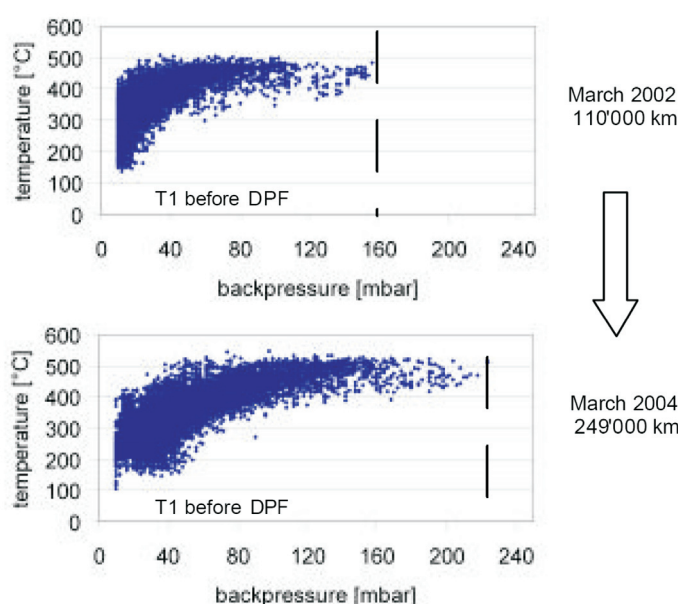
W starszych autobusach klasy Euro 1 nie było możliwe uzyskanie wystarczającej spławności regeneracji oraz trwałości filtra CRT. Następowo tam bowiem zbyt szybkie zanieczyszczenie filtra (po około 6-8 tys. km) a po kilku intensywnych regeneracjach dochodziło do uszkodzenia filtra. Z tego powodu zadecydowano o wypróbowaniu innych rozwiązań filtrów DPF.

ues of backpressure increased in this period from approx. 160 mbar to 225 mbar.

Figures 10 & 11 show the increase of average backpressure for different vehicles over the driving distance. The effect of ash plugging is not problematic and fulfils entirely the expectations. For the newest group of three-axes with OEM-CRT no plugging at all can be remarked after 90 000 km (Fig. 11).

6. Testing of DPF's on Euro 1 Busses

The CRT couldn't reach the necessary continuous regeneration and durability on the older Euro 1 busses. The plugging of the filter happened too quickly (about 6-8 thousands km) and some intensive regenerations provoked damages of filters. Therefore some other solutions were researched.



Rys. 9. Zależność przeciwi-ciśnienia i temperatury w układzie wylotowym z filtrem DPF autobusu Mercedes Citaro nr 124 (w okresie rocznym), olej napędowy Greenergy, czas pomiaru 15 s

Fig. 9. Correlations of backpressure and temperatures (in a 1-year period) Bus Citaro 124, sampling rate 15 s with DPF and Greenergy

6.1. JM with additive

On the bus No. 113 was initially tried to help the regeneration of CRT with FBC (CDT: 0.5 ppm wt. Pt & 7.5 ppm wt. Ce, dosing 1/1500) by additizing one tank filling after 6,360 and after 8,570 km, but it finally damaged the trap. It was decided to apply the Johnson Matthey – DPF system with:

- cordierite trap type DPF 201,
- electrical regeneration unit for stand still,
- automatic additivation system,
- backpressure indication.

The relatively long exhaust pipe between engine and DPF was isolated. The electric regeneration with the heating unit upstream of the trap was intended only for research purposes, when the additive-supported regeneration won't work.

6.1. Filtr Johnson Matthey i dodatek katalityczny do paliwa

W autobusie nr 113 próbowano początkowo wspomóc proces regeneracji filtra CRT przez zastosowanie dodatku katalitycznego do paliwa (FBC) o nazwie CDT, zawierającego 0,5 ppm platyny i 7,5 ppm ceru. Dodatek ten wprowadzono przy pełnym zbiorniku paliwa w proporcji 1:1500, po przebiegu 6360 i 8570 km. Ostatecznie jednak dodatek spowodował uszkodzenia filtra. Wobec tego niepowodzenia zdecydowano się zastosować system DPF firmy Johnson Matthey składający się z:

- kordierytowego filtra typu DPF 201,
- elektrycznego układu do regeneracji filtra na postoju pojazdu,
- automatycznego systemu dawkowania dodatku katalitycznego do paliwa,
- wskaźnika przeciwności w układzie wylotowym.

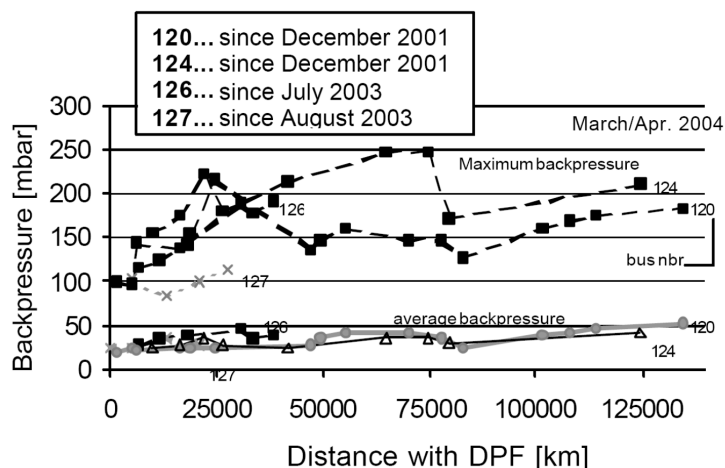
Na potrzeby badań długi odcinek przewodu wylotowego między silnikiem a filtrem DPF został zaizolowany cieplnie. Układ do regeneracji cieplnej z urządzeniem grzejnym umieszczonym przed filtrem został przeznaczony wyłącznie do celów badawczych i uruchamiany był jedynie wówczas, gdy nie dokonywano regeneracji wspomaganą dodatkiem katalitycznym.

Stosowano następujące dodatki katalityczne do paliwa:

- w pierwszym okresie – Eolys DPX 9 (zawierający cer),
- w drugim okresie – Eolys DPX 10 (zawierający cer i żelazo w proporcji 7:3).

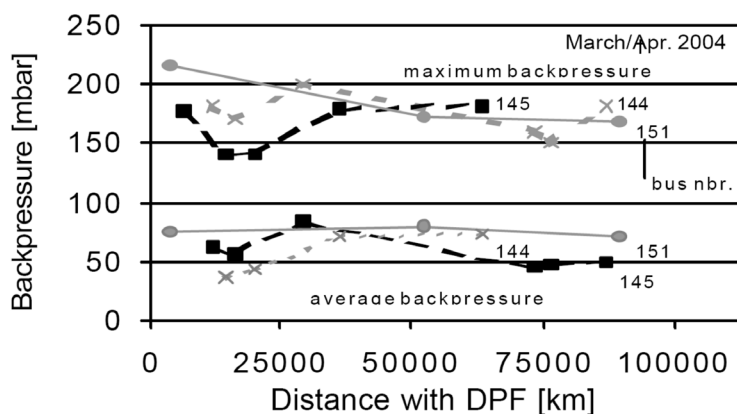
W toku badań niestety stwierdzono, że zapelnienie filtra następuje zbyt szybko (po około 3000 km), co jest nie do przyjęcia w normalnej eksploatacji w przedsiębiorstwie transportu publicznego. Okazało się także, że w pierwszym okresie badań układ dozowania znacznie przekraczał zalecaną dawkę dodatku, gdyż mylnie rozpoznawał plusk w zbiorniku paliwa jako jego napełnianie. W efekcie, zanieczyszczenia usuwane z filtra podczas jego wielokrotnego oczyszczania zawierały większość metalu zawartego w dodatku, a także anhydryt (CaSO_4).

Stwierdzone podczas badań zmniejszenie mocy pojazdu zostało przypisane zanieczyszczeniu wtryskiwaczy. Faktycznie podczas badania wtryskiwaczy po 6000 km (tj. w okresie największego przedawkowania dodatku katalitycznego) stwierdzono bardzo duże osady na końcówkach wtryskiwaczy. Osady te były zarówno czarne (koks i sadza) – wskazujące to na duże zużycie oleju przez silnik, jak i białoszare – pochodzące z dodatku katalitycznego. Występowały również nieregularności w strudze wtryskiwanego paliwa oraz ślady zużycia i zakleszczenia się iglicy wtryskiwacza. Ogólnie, praca wtryskiwaczy była zaburzona przez osady pocho-



Rys. 10. Przeciwność w układzie wylotowym w funkcji przebiegu – grupa autobusów Euro 2 (10 pojazdów)

Fig. 10. Evolution of the backpressure on the busses group 10x Euro 2



Rys. 11. Przeciwność w układzie wylotowym w funkcji przebiegu – grupa autobusów Euro 3 (10 pojazdów)

Fig. 11. Evolution of the backpressure on the busses group 10x Euro 3

The additives used were:

- in the first period – Eolys DPX 9 (contains Cerium Ce),
- in the second period – Eolys DPX 10 (contains Fe & Ce, 3:7).

Unfortunately the plugging of the filter occurred too quickly (after about 3,000 km) to be accepted for the normal work of the public transportation.

It turned out, that the addition system strongly overdosed in the first period, because it registered the splashing of fuel in the tank as refueling. As a result the residues gained from the filter during numerous cleanings contained a majority of additive metal, but also the anhydrite CaSO_4 .

During the tests a power loss of the vehicle was also attributed to the injectors fouling. Indeed the investigated injectors after 6,000 km (in the period with the strongest overdosing) showed very strong deposits on the injector tip. These deposits were both: black-coke and soot, showing high lube oil consumption and gray-white, indicating more the residues from additive. There were irregularities of injection jets

dzące w głównej mierze z przedawkowanego dodatku katalitycznego.

W dalszych próbach filtr bez pokrycia katalitycznego zastąpiono filtrem z warstwą katalityczną oraz zastosowano niskopopiołowy olej silnikowy. Te próby również nie zakończyły się sukcesem, gdyż filtr uległ uszkodzeniu po około 2000 km.

Wydaje się, że głównym powodem niepowodzeń na tym etapie badań były pochodzące z dodatku katalitycznego zanieczyszczenia i osady, powstające przede wszystkim z powodu nieprawidłowego działania układu dozowania. Spośród innych powodów wymienić można znaczne zużycie oleju oraz niższą niż w przypadku autobusów klasy Euro 2 temperaturę spalin przed filtrem, z uwagi na większą odległość filtra od silnika. Dla filtra o regeneracji ciągłej CRT na proces regeneracji wpływa również stosunek NO_x do sadzy w spalinach. Inne warianty systemu, takie jak: lepszy system dozowania dodatku katalitycznego, inny dodatek, dławienie przepływu spalin i regeneracja płomieniowa, nie mogły być już niestety przebadane.

6.2. Filtr CRT z warstwą katalityczną firmy HJS

Innym obiecującym rozwiązaniem dla autobusów klasy Euro 1 jest filtr cząstek stałych o regeneracji ciągłej pokryty warstwą katalityczną platyny. Badania w tym zakresie zostały przeprowadzone przez Clean-Life Umwelttechnik GmbH, przedstawiciela HJS w Szwajcarii. Badania drogowe oraz długookresowa analiza parametrów pracy została wykonana w ramach projektu CBB. Po dwóch nieudanych próbach z filtrami bez warstwy katalitycznej, zakończonych zapelnieniem filtra po odpowiednio 6000 i 8000 km, zastosowany został filtr z warstwą katalityczną platyny. Działał on bezawaryjnie przez ponad rok (ponad 55000 km), wykazując dobrą skuteczność filtracji i niskie przeciwcisnienie. Wyniki są zachęcające, choć w tym szczególnym typie autobusów, gdzie występują niekorzystne warunki regeneracji, okresy między oczyszczaniem filtra lub jego wymianą muszą być najprawdopodobniej skrócone do 50 lub 60 tys. km. W badanym pojeździe, krótko po ostatniej kontroli, materiał filtra uległ uszkodzeniu cieplnemu.

7. Jakość oleju silnikowego

Znaczenie odpowiedniej jakości oleju silnikowego oraz małego zużycia oleju w układach wyposażonych w filtry DPF zostało potwierdzone w szwajcarskich pracach w zakresie wyposażania eksploatowanych maszyn budowlanych i autobusów w filtry DPF [1, 3, 15, 16]. Stosowanie niskopopiołowych i niskosiarkowych olejów silnikowych zmniejsza ilość nieusuwalnych zanieczyszczeń filtra i wydłuża okres pomiędzy kolejnymi czyszczeniami filtra. Z drugiej jednak strony oleje te mogą mieć niższą trwałość i wtedy konieczne są częstsze ich wymiany. Mając na uwadze wagę zagadnienia zdecydowano o zebraniu podstawowych informacji na temat wpływu oleju silnikowego na emisję cząstek stałych. Dokonano tego w ramach pracy promocyjnej realizowanej na Uniwersytecie w Biel [17] z wykorzystaniem nowoczesnego silnika VW TDI (1,9 dm³). Właściwości używanych w badaniach olejów silnikowych przedstawiono w tabeli 6.

(injection image) and traces of wear and sticking on the injector needles. In summary the injectors were affected by residues, which by a major part originated from the over-dosed additive.

In the further trials the noncoated filter was replaced by a coated one and a lube oil with lower ash content was used. This was also not successful and the trial finished with a damage of the filter after approx. 2,000 km.

From the present results appears, that the primary reason of difficulties were the additive – related residues – mostly because of malfunctioning of the additive dosing system. Other reasons were: the oil consumption and the tendentially lower gas temperatures before trap comparing to Euro 2 busses (longer line between engine and DPF). For CRT the NO_x / soot ratio has an influence on the regeneration. Unfortunately further variants of systems could not be tested, like: better additive dosing, other additive; throttling; burner.

6.2. HJS coated CRT

Another promising solution for Euro 1 busses is the Platinum-coated CRT. The research with it was performed by Clean-Life Umwelttechnik GmbH, Swiss representative of HJS, with the support of field control and datalogger screening ensured by CBB-project. After two unsuccessful attempts with noncoated CRT – plugging of the trap after 6,000 resp. after 8,000 km – a Pt-coated trap was installed. This one worked faultless over more than 1 year (over 55,000 km), keeping a good filtration efficiency and a low backpressure.

These results are encouraging, but on this special type of busses with difficult conditions for regeneration, the cleaning-, or exchange intervals must be shortened (most probably to 50, or 60 thousand km). Shortly after the last control the filter material got a thermal damage.

7. Lube oil quality

The importance of lube oil quality and low lube oil consumption for the DPF-technology was recognized in the Swiss activities about retrofitting of construction machines and city busses with particle filter systems, [1, 3, 15, 16]. Low ash- and low sulphur oil diminish the irreversible deposits and increase the cleaning intervals of DPF's, but on the other side there is a challenge about the durability of oil and shortening of the oil exchange intervals. It was decided to get basic informations about the influences of lube oils on the engine-out particle emissions. This was done in the thesis work of the reporting laboratory [17], on a modern VW TDI engine (1.9 L).

The data of the investigated lube oils are summarized in the following Table 6.

To enable the lubricants to fulfill the different requirements packages of additives are used. Only the DEA-oil is entirely without additives and can be used in the engine only for several hours. This is a research non-market oil, a mixture of paraffinic hydrocarbons between C12 and C26.

The additives protect the oil (antioxidants, antifoam), protect the engine (anticorrosive, antiwear) and control the long-life quality of the oil (detergent, dispersive, viscosity

Tabela 6. Właściwości olejów badawczych
Table 6. Data of the investigated oils

| Właściwość / Property | Jednostka / Unit | Castrol SAE 5W30 | Motorex 15W40 | DEA DES-6089 | Lubrizol Red 15W40 | Lubrizol Blue 15W40 | Lubrizol Green 5W30 |
|---|------------------|------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Lepkość kinematyczna w temp. 40°C / Viscosity kin. 40°C | [mm²/s] | 70,57 | 108,9 | 94,92 | 104,8 | - | 69,76 |
| Lepkość kinematyczna w temp. 100°C / Viscosity kin. 100°C | [mm²/s] | 11,6 | 14 | 13,45 | 14,22 | 13,98 | 11,8 |
| Wskaźnik lepkości / Viscosity index | [-] | 159 | 135 | 142 | 139 | - | 166 |
| Gęstość w temp. 15°C lub 20°C / Density @ 15°C ou 20°C | [g/ml] | 0,8617 | 0,885 | 0,8392 | - | - | - |
| Liczba zasadowa / Total Base Number | [mg KOH/g] | | 11,1 | 0,55 | 13,5 | 8,4 | 5 |
| Temperatura płynięcia / Pourpoint | [°C] | -54 | -27 | -54 | | | |
| Popiół siarczanowy / Sulphated ash | [%] | 1,52 | | | 1,8 | 1,077 | 0,47 |
| Siarka / Sulfur | [%] | 0,2 | 0,73 | 0,0005 | 0,65 | 0,336 | 0,2 |
| Mg | [%] | 0,04 | 0,0422 | | 0,001 | 0,001 | 0,022 |
| Zn | [%] | 0,14 | 0,1572 | | 0,127 | 0,12 | 0,105 |
| Ca | [%] | 0,33 | 0,3655 | | 0,473 | 0,263 | 0,06 |
| P | [%] | 0,13 | 0,1433 | | 0,116 | 0,111 | 0,095 |
| Mo | [%] | | 0,0116 | | | | |

Dla spełnienia przez oleje silnikowe szeregu różnicowanych wymagań stosowane są pakiety dodatków uszlachetniających. Wśród badanych olejów jedynie olej DEA nie zawierał żadnych dodatków, stąd też mógł być eksploatowany w silniku jedynie przez kilka godzin. DEA jest to olej badawczy, niedostępny w handlu, będący mieszaniną węglowodorów parafinowych od C12 do C26.

Dodatki uszlachetniające (przeciwutleniacze, dodatki przeciwpienne) chronią olej silnikowy, chronią silnik (dodatki antykorozyjne, przeciwzuzyciowe) oraz zapewniają utrzymanie wymaganych właściwości oleju przez długi okres czasu (dodatki myjące, dyspergatory, modyfikatory lepkości itd). Dodatki są też istotnym źródłem substancji, prowadzących do odkładania się nieusuwalnych popiołów w filtrach DPF. Popioły te składają się głównie z siarczanów, fosforanów oraz tlenków: wapnia, magnezu i cynku [18, 19].

Na rysunku 12 przedstawiono emisję nanocząstek w różnych punktach pracy silnika przy zastosowaniu różnych olejów silnikowych. Słupki odpowiadające na wykresie poszczególnym olejom uporządkowano według malejącej zawartości siarki. W zakresie wszystkich parametrów określających ilość cząstek (SMPS, PAS, DC) i we wszystkich punktach pracy silnika uzyskano zależność całkowicie sprzeczną z oczekiwaniami, a mianowicie, że oleje z najniższą zawartością siarki

index, etc.). The additive packages are a major source of elements, which produce the irreversible ashes in the DPF; ashes consisting mostly of sulfates, phosphates and oxides of Ca, Mg and Zn, [18, 19].

Figure 12 represents the nanoparticle emissions at different operating points with the different investigated lube oils. The graphs are arranged in the sequence of decreasing oil sulfur content. All represented parameters (SMPS, PAS, DC) confirm at all operating conditions, that the oils with the lowest S-content produce an increase of particle emissions, which is completely opposite to the expectations.

It must be deduced, that the oil composition and the additive packages in each oil (except DEA), play also an important role in the particle formation.

The observed emission differences are certainly an effect of combination of different influences, like:

- impact of the oil with the piston rings and cylinder wall due to its viscosity,
- influence of the oil on blow-by flow and blow-by composition,
- impact of the oil at the cylinder walls during the combustion, oil evaporation, adsorption and desorption of fuel,

powodują wzrost emisji cząstek stałych. Należy zatem wnioskować, że skład oleju, a także pakiety dodatków (oprócz oleju DEA) mają istotny wpływ na tworzenie cząstek stałych. Zaobserwowane różnice w emisji są zapewne skutkiem połączenia różnych oddziaływań, takich jak:

- oddziaływanie oleju z pierścieniami tłokowymi i ścianką cylindra z powodu lepkości oleju,
- wpływ oleju na ilość i skład przedmuchów do skrzyni korbowej,
- oddziaływanie warstwy oleju na ścianie cylindra podczas spalania – parowanie oleju, adsorpcja i desorpcja paliwa,
- wpływ składu oleju na skład cząstek stałych oraz na zjawisko kondensacji (szybkość wzrostu kropel).

Dla wyjaśnienia roli wszystkich tych zjawisk, a być może także emisji wtórnej, niezbędne są dalsze obszernie badania.

8. Wnioski

Emulsja wodna oleju napędowego

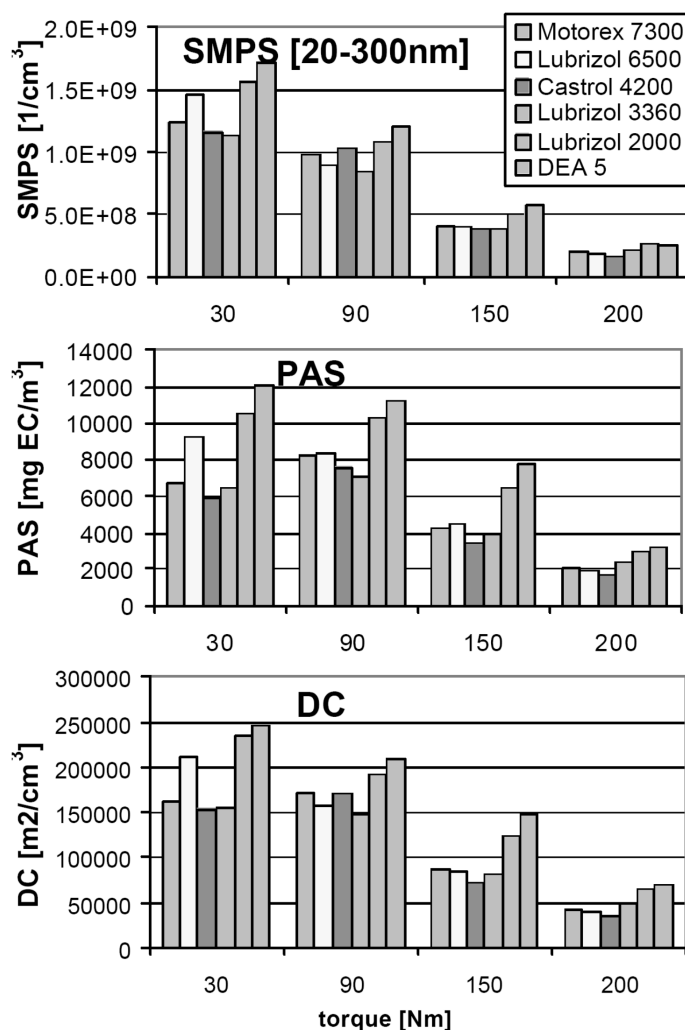
- Zastosowanie jako paliwa emulsji DWE łącznie z filtrem CRT obniża emisję wszystkich toksycznych składników spalin, w tym ilość i masę emitowanych cząstek stałych.
- Stosując emulsję należy przestrzegać zaleceń producenta oraz okresu trwałości emulsji.
- Emulsja korzystnie wpływa na regenerację filtra DPF; w badaniach drogowych nie stwierdzono żadnych problemów wzajemnego oddziaływania emulsji i filtra CRT.
- W przypadku nowoczesnych układów wtryskowych zastosowanie emulsji DWE może wiązać się z trudnościami ze względu na:
 - niebezpieczeństwo rozkładu termicznego paliwa,
 - wpływ emulsji na czas i przebieg wtrysku paliwa oraz stopień EGR.

Badania drogowe

- Nie ma problemów w eksploatacji filtrów CRT w autobusach klasy Euro 2 i 3.
- Zamiana tłumika na filtr CRT nie wywołuje wzrostu emisji hałasu.
- Filtr CRT obniża ilość CO oraz zadymienie spalin przy swobodnym przyspieszaniu, nie wykazuje natomiast wpływu na ilość HC na biegu jałowym oraz NO_x .
- W okresie pracy filtra wynoszącym 150 tys. km przebiegu nastąpił wzrost maksymalnego przeciwnieśnienia w układzie wylotowym pojazdu z 160 do 225 mbar spowodowany zanieczyszczeniem filtra popiołem.
- Przebieg pojazdu bez konieczności oczyszczania filtra CRT wynosi ponad 150 tys. km.

Autobusy klasy Euro 1

- W przypadku autobusów klasy Euro 1, zwykły filtr CRT działa w sposób niezadowalający.



rys. 12. Stężenie cząstek stałych w spalinach przed reaktorem katalizacyjnym przy różnych olejach silnikowych; $n = 2000$ obr/min

Fig. 12. Nanoparticle emissions with different lube oils before catalyst at 2000 rpm

- influence of the oil composition on the particle composition and on the condensation effects (speed of droplets growth).

To clarify all those effects and the possible secondary emissions a considerable further investigations are necessary.

8. Conclusions

Emulsion fuel.

- Water emulsion fuel combined with CRT reduces significantly all emission components including particle mass and counts.
- Using emulsion fuels the recommendations of the manufacturer and the life time of emulsion have to be considered.
- Water emulsion fuel supports the DPF regeneration and showed in this respect no problem with CRT during the field test.

- Filtr CRT z warstwą katalityczną platyny spełnia lepiej swoje zadanie – ciągła regeneracja odbywa się prawidłowo, ale posiada ograniczoną trwałość (55 tys. km).
- Kordierytowy filtr (JM 1) w połączeniu z dodatkami katalitycznymi do paliwa nie spełnił swojego zadania głównie z uwagi na przedawkowanie dodatku i wysokie zużycie oleju przez silnik.
- Kordierytowy filtr z warstwą katalityczną (JM 2) w połączeniu z dodatkami katalitycznymi do paliwa nie spełnił swojego zadania z powodu uszkodzenia cieplnego po przebiegu około 1500 km.
- Inne warianty regeneracji jak: inne dodatki katalityczne, dławienie przepływu spalin i regeneracja płomieniowa nie mogły być już przebadane z uwagi na wycofanie tej grupy pojazdów z programu wyposażania w filtry DPF.

Oleje silnikowe

- Niższa zawartość siarki i dodatków uszlachetniających w oleju nie koniecznie oznacza niższą emisję cząstek stałych przez silnik.
- Skomplikowana natura wpływu oleju silnikowego na emisję cząstek stałych powoduje, że pozostaje kilka zagadnień do wyjaśnienia w toku dalszych badań.

9. Podziękowania / Acknowledgement

Autorzy pragną podziękować za pomoc w realizacji projektu następującym instytucjom i osobom / *The authors express their gratitude for the support and realization of the project to:*

- BUWAL (FOEFL), Mr. D. Zürcher, Environmental Technology,
- Biel City Bus Company, Mr. Ch. Kneuss, Mr. P. Hostettler, Mr. O. Longchamp
- Total Fina ELF, Mr. Sirolli,
- Johnson Matthey GmbH, Mr. P. Werth,
- Clean Life Umwelttechnik GmbH, Mr. R. Blunier,
- Lubrizol Ltd., Mr. G. Marshall,
- To the team AFHB, Mr. Ph. Wili, Mr. J.-L. Pétermann, Mr. M. Clénin.

Artykuł recenzowany

- Water emulsion fuel can create problems with modern injection systems:
 - danger of thermal decomposition,
 - changed injection duration and influence on EGR and on injection timing.

Field control.

- Busses Euro 2 and Euro 3 work without problems with CRT.
- Replacing of silencer by DPF doesn't create any problems of noise.
- CRT lowers CO and black smoke at free acceleration and shows no influences on HC at idle speed and NO_x.
- In a working period of 150,000 km the maximum back-pressure for one exemplary vehicle increased from 160 mbar to 225 mbar due to ash plugging.
- The necessary CRT cleaning periods will be longer, than 150,000 km.

Euro 1 busses.

- CRT doesn't work satisfactorily on the Euro 1 busses.
- A Pt-coated CRT shows the expected improvement – continuous regeneration well working (until 55,000 km).
- Cordierite trap (JM 1) with additive failed mostly due to the overdosing of additive and high lube oil consumption.
- A coated Cordierite trap (JM 2) with additive failed due to thermal damage after approx. 1 500 km.
- Other regeneration measures, like other additives, throttling, or burner couldn't be tested due to the decision of the user to drop this vehicle group from the retrofitting program.

Lube oils.

- Reduced sulfur and lower additive content of the lube oil don't necessarily reduce the particle emission of the engine.
- The complex influences of oil quality on the particle emissions offer several open questions for further research.

Skróty i oznaczenia / Abbreviations and Nomenclature

- AFHB – Laboratorium Toksyczności Spalin Uniwersytetu Nauk Stosowanych w Biel-Bienne / *Abgasprüfstelle der Fachhochschule, Biel CH (Lab. For Exhaust Gas Control, Univ. of Appl. Sciences, Biel-Bienne, Switzerland)*
- BUWAL – Federalny Urząd Ochrony Środowiska, Lasów i Krajozbrazu (szwajcarski odpowiednik EPA) / *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Swiss EPA, FOEFL)*
- CBB – projekt badawczy dotyczący poprawy właściwości ekologicznych autobusów miejskich w Biel-Bienne / *Clean Biel Busses*
- CRT – filtr cząstek stałych o regeneracji ciągłej / *continuously regenerating trap*
- DC – dyfuzyjny czujnik ładowania / *diffusion charging sensor*

- DPF – filtr cząstek stałych do silników o zapłonie samoczynnym / *Diesel Particle Filter*,
- DWE – emulsja wodna oleju napędowego / *Diesel Fuel-Water Emulsion*
- EC – węgiel elementarny / *elemental carbon*
- EDC – elektroniczny system sterowania silnika o zapłonie samoczynnym / *electronic diesel control*,
- EGR – recyrkulacja spalin / *exhaust gas recirculation*
- ELPI – elektryczny niskociśnieniowy próbnik / *electric low pressure impactor*
- FBC – katalityczny dodatek do paliwa / *fuel born catalyst (fuel additive)*

FOEFL – Federalny Urząd Ochrony Środowiska, Lasów i Krajo-
brazu (szwajcarski odpowiednik EPA) / *Federal Office for
Environment, Forests and Landscape (Swiss EPA, BUWAL)*
NP – nanocząstki / *nanoparticles*
OEM's – producenci fabrycznie montowanego wyposażenia / *ori-
ginal equipment manufacturers*
PAS – fotoelektryczny czujnik rozpylenia / *Photoelectric Aerosol
Sensor*
PM – cząstki stałe / *particle mass, particulate matter*

SMPS – miernik wielkości cząstek na podstawie ruchliwości w
polu elektrycznym / *scanning mobility particle sizer*
TTM – Technika Maszyn Ciepłych / *Technik Thermische Ma-
schinen*
ULSD – olej napędowy o bardzo niskiej zawartości siarki / *ultra
low sulfur diesel*
VERT – obniżenie emisji maszyn rzeczywistych w budowie tuneli
/ *Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tun-
nelbau*

Literatura/Bibliography

- [1] Mayer A.: VERT – Verminderung der Emissionen von Real-Dieselmotoren im Tunnelbau. Ein Verbund-projekt von SUVA, AUVA, TBG und BUWAL. Abschlussbericht, TTM W01/01/2000, VERT Final Report, www.suva.ch, Febr. 2000.
- [2] Czerwinski J., Mayer A.: Diesel Particle Filter Technology for Construction Machines – Swiss Activities & Experiences. 7th International Mine Ventilation Congress, Cracow, Poland, June 18. 2001.
- [3] Particulate traps for heavy duty vehicles. Environmental documentation No. 130, Air. Swiss Agency for Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Berne 2000.
- [4] Mayer A., Evéquoz R., Wyser M., Czerwinski J., Matter U., Graf P.: Particulate Traps used in City-Busses in Switzerland. SAE-Paper 2000-01-1927, TTM, BUWAL, AFHB, ETHZ, EMPA, Fuel & Lubricants Meeting Paris, June 2000.
- [5] Mayer A., Czerwinski J., Nöthiger P., Zbinden R., Evéquoz R.: Particulate Trap Selection for Retrofitting Vehicles Based on Representative Exhaust Temperature Profiles. SAE-Paper 2001-01-0187, Detroit, March 5-8.2001, TTM, AFHB, Loglink, INFRAS, BUWAL.
- [6] 4. International ETH-Conference on Nanoparticle Measurement, Zurich, 7.-9. Aug. 2000.
- [7] 5. International ETH-Conference on Nanoparticle Measurement, Zurich, 6.-7. Aug. 2001.
- [8] Van Poppe M., Stevens M., De Keukeleere D.: Performance of a Continuous Regenerating Trap on City Busses in Real Traffic Conditions. SAE Techn. Paper 2001-01-060, SAE 5th International Combustion Engines Conference, Naples, Italy, Sep. 23-27, 2001.
- [9] Development of Diesel Exhaust Gases Filtration Technology with Application of Fuel Additives Enabling Continuous Regeneration of Filters to Minimize the Particulate Emissions of City Busses. European Commission Project, DIEXFIL, CRAFT-1999-70982, July 2001.
- [10] Mayer A.: Nachrüstung von 1,2 Millionen Dieselmotoren mit Partikelfiltern in Kalifornien. MTZ 1/2002, Jg. 63, S. 44.
- [11] Ranalli M., Zelenka P., Schmidt S., Elfinger G.: An active Regeneration Aid as a Key Element for Safe Particulate Trap Use. SAE Techn. Paper 2001-01-062, SAE 5th International Combustion Engines Conference, Naples, Italy, Sep. 23-27, 2001.
- [12] Czerwinski J., Napoli S.: ELFAQUAZOLE fuel with CRT & SiCDPF in the VERT engine dynamometer test. Project "Clean Biel Busses" 1st report, AFHB B093, Sept. 2001.
- [13] Czerwinski J., Napoli S., Pétermann J.-L., Wili Ph.: Vehicle Data, Datalogger Screening und Field Control of the Biel Bus Fleet. Project: Clean Biel Busses, 2nd report, AFHB, B103, Jan. 2002.
- [14] Czerwinski J., Zimmerli Y., Wili Ph.: Field control of the Biel bus-fleet during the DPF-retrofitting program; further results with emulsion fuel, JM-DPF and other lube oils. Project: Clean Biel Busses, 3rd report, AFHB, B146, April/May 2004.
- [15] Mayer A., Czerwinski J., Pétermann J.-L., Wyser M., Legerer F.: Reliability of DPFSYSTEMS: Experience with 6000 Applications of the Swiss Retrofit Fleet. SAE Paper 2004-01-0076, TTM, AFHB, BUWAL, AKPF.
- [16] 7th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles, www.nanoparticles.ethz.ch
- [17] Brun D.: Influences de la qualité de l'huile sur les émissions limitées et non limitées du moteur TDI. Travail de diplôme, Moteurs à combustion, Ecole d'Ingénieurs Biel-Bienne, Suisse.
- [18] Hilzendeger J., Rhunke A., Paehr G., Engler H.-J.: Anforderungsprofil an zukünftige Schmierstoffe für Pkw-Dieselmotoren mit aktiver Abgasnachbehandlung. Volkswagen AG., VDI-Bericht Nr. 1803, S. 281, Konferenz, Wolfsburg, Dez. 2003.
- [19] Omeis J., Harperscheid M., Schuylenburg V.: Motorenöle im Zielkonflikt zwischen motorischer Performance und geringer Kontamination von Abgasnachbehandlungssystemen. Fuchs Europe GmbH. FAD Konferenz, Dresden, Nov. 2003.

Jan Czerwinski – Dozierende, Leiter Abgasprüfstelle + Motorlabor,
Uniwersytet Nauk Stosowanych, Biel-Bienne, Szwajcaria.

Jan Czerwinski – University of Applied Sciences, Biel-Bienne, Switzerland.

Yan Zimmerli – Nachf. Napoli, Assistent, Uniwersytet Nauk
Stosowanych, Biel-Bienne, Szwajcaria.

Yan Zimmerli – University of Applied Sciences, Biel-Bienne,
Switzerland.



Andreas Mayer – Technik Thermische Maschinen, Szwajcaria

Andreas Mayer – Technik Thermische Maschinen