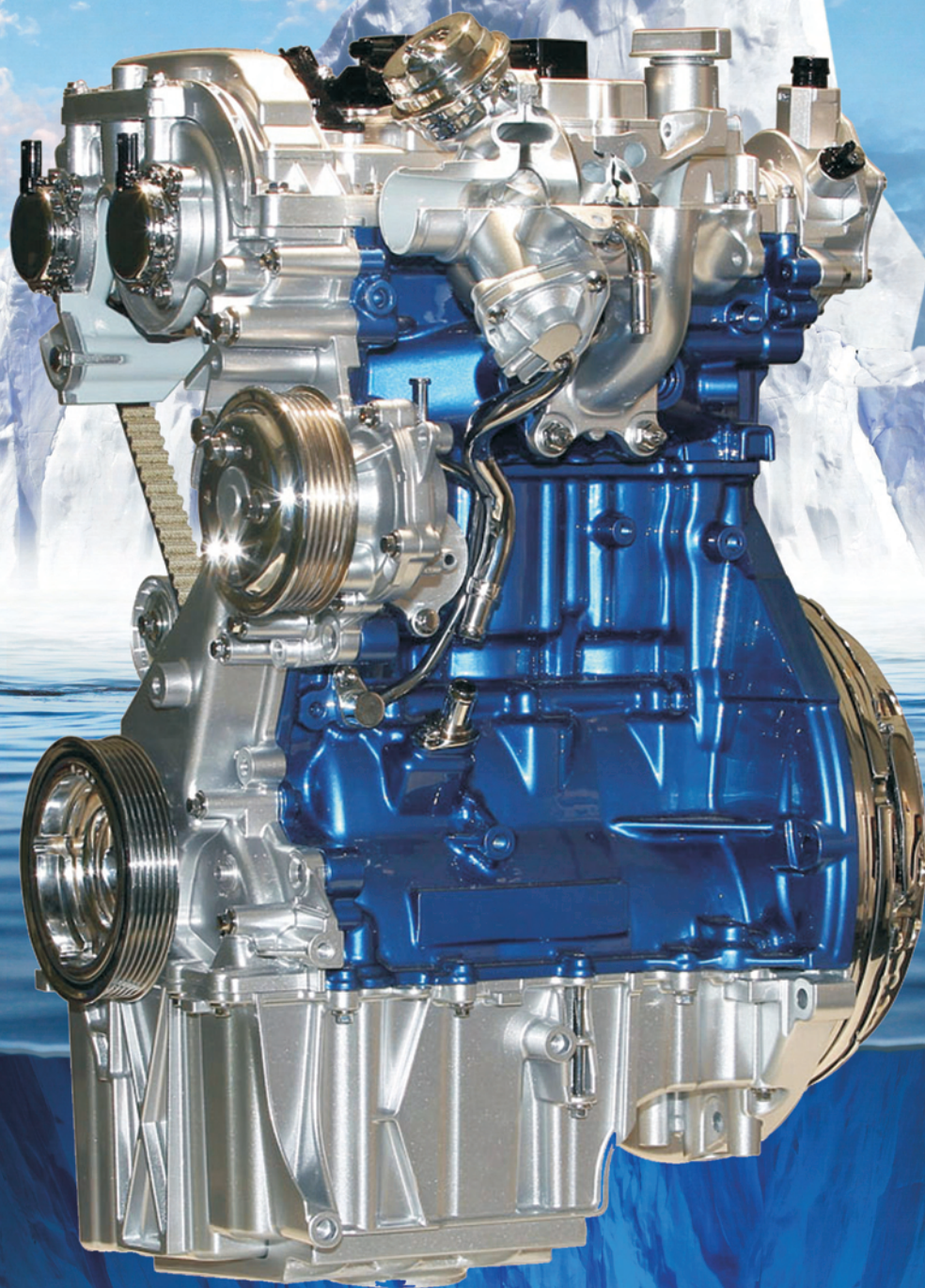




2/2012 (149)



COMBUSTION ENGINES

SILNIKI SPALINOWE

**Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji
BOSMAL Sp. z o.o.**

ul. Sarni Stok 93
43-300 Bielsko-Biała
bosmal@bosmal.com.pl
www.bosmal.com.pl

tel.: +48 33 8130 539, fax: +48 33 8125 038

Badania:

- silników
- pojazdów
- emisji spalin
- materiałów
- części i zespołów samochodowych
- wymienników ciepła
- elektrotechniczne i elektroniczne
- pomiary metrologiczne

Projektowanie:

- obliczenia, konstrukcje i analizy matematyczne
- konstrukcyjna obsługa produkcji

Wykonawstwo:

- przyrządów kontrolno-pomiarowych
- szablonów /2D i 3D/
- wyposażenia technologicznego linii produkcyjnych

Usługi:

- prace związane z wprowadzeniem do obrotu części/zespołów wg obowiązujących przepisów o certyfikacji i homologacji
- normalizacja i patenty
- biblioteka techniczna
- dokumentacja eksploatacyjna

Testing:

- engines
- vehicles
- exhaust emission
- materials
- automotive parts and assemblies
- heat exchangers
- electrotechnical and electronic tests
- metrologic measurements

Design:

- engineering calculations, structures and mathematical analyses
- engineering service of production

Production:

- control-measuring apparatus
- templates (2D and 3D)
- technological tooling of production lines.

Services:

- work connected with introduction to market new parts/assemblies of cars with respect to mandatory regulations
- standardization and patents
- technical library
- operational documentation



COMBUSTION ENGINES

SILNIKI SPALINOWE

A Scientific Magazine/Czasopismo naukowe

2/2012 (149)

Rok XLXI

PL ISSN 0138-0346

Editor/Wydawca:

Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych

43-300 Bielsko-Biała, ul. Sarni Stok 93, Polska

tel.: 33 8130402, fax: 33 8125038

E-mail: sekretariat@ptnss.pl

WebSite: <http://www.ptnss.pl>

Scientific Board/Rada Programowa:

Prof. Krzysztof Wisłocki – Chairman, Poland

Prof. Bernard Challen – UK

Prof. Zdzisław Chłopek – Poland

Prof. Giovanni Cipolla – Italy

Prof. Karol Cupiał – Poland

Prof. Jan Czerwiński – Switzerland

Prof. Vladimír Hlavna – Slovakia

Prof. Kazimierz Lejda – Poland

Prof. Hans Peter Lenz – Austria

Prof. Helmut List – Austria

Prof. Jan Macek – Czech Republic

Prof. Janusz Mysłowski – Poland

Prof. Andrzej Niewczas – Poland

Prof. Marek Orkisz – Poland

Prof. Dieter Peitsch – Germany

Prof. Leszek Piaseczny – Poland

Prof. Stefan Pischinger – Germany

Prof. Roger Sierens – Belgium

Prof. Andrzej Sobiesiak – Canada

Prof. Maciej Sobieszcański – Poland

Prof. Richard Stobart – UK

Prof. Robin Vanhaelst – Germany

Prof. Michael P. Walsh – USA

Prof. Piotr Wolański – Poland

Prof. Mirosław Wyszynski – UK

Editorial/Redakcja:

Institut Silników Spalinowych i Transportu

Politechnika Poznańska

60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3

tel.: 61 6652207, 61 6652118

E-mail: silniki@ptnss.pl

prof. dr hab. inż. Jerzy Merksiz (Editor-in-Chief/redaktor naczelny)

mgr Krystyna Bubacz (Editorial Office/sekretarz redakcji)

redakcja@ptnss.pl

dr inż. Ireneusz Pielecha, dr inż. Mirosław Kozak

prof. dr hab. inż. Marek Brzeżański, dr inż. Jacek Pielecha

Collaboration/Współpraca:

mgr T. Pawlak, dr inż. M. Waligórski

Editorial

Dear readers,

Our current issue of *Combustion Engines/Silniki Spalinowe* is devoted to exhaust emissions from motor vehicles. The ecological aspects are the ones that most intensely set the trends in the development of engines and vehicles. To prove this great challenge for the engineers it is sufficient to say that current emission limits have been restricted up to several hundred times as compared to the first ones introduced more than fifty years ago. Despite such great advancement in the area of exhaust emissions the problem has not yet been fully resolved and the means of transport utilizing combustion engines still remain the main source of pollution of the environment. In the European Union transport has an over 60% share in the emission of carbon monoxide and nitric oxides not to mention the 25% share in the emission of carbon dioxide.

To present the problems of exhaust emissions to our readership in a more comprehensive way in the current issue we included a CD containing the proceedings from the 3rd International Exhaust Emissions Symposium held on 24-25 May 2012 at BOSMAL Automotive Research and Development Institute in Bielsko-Biała. This event was also an occasion to celebrate the 40-th anniversary of the BOSMAL's activity. BOSMAL is a highly recognized entity in the Polish automotive industry. Throughout the years the institute has carried out a variety of research and development works related to engines of Polish and worldwide design. It has also had a great input in the research into exhaust emissions. On the occasion of the anniversary in the current issue we give you the results of several scientific works realized by the BOSMAL employees together with a short article on the institute's history and achievements.

Editorial

Combustion Engines/Silniki Spalinowe

Szanowni Czytelnicy,

Bieżący numer kwartalnika *Silniki Spalinowe/Combustion Engines* w głównej mierze poświęcamy problematyce emisji szkodliwych substancji przez pojazdy samochodowe. Względy ekologiczne należą do czynników, które obecnie w największym stopniu stymulują rozwój silników i pojazdów. Jak wielkie jest to wyzwanie dla konstruktorów i badaczy świadczy fakt, że obecne limity emisji szkodliwych składników spalin, w porównaniu do pierwszych limitów wprowadzonych przed około pięćdziesięciu laty, zostały zaostrzone nawet kilkaset razy. Mimo tak ogromnego postępu w dziedzinie toksyczności spalin silnikowych, problem nie został całkowicie rozwiązany i środki transportu napędzane silnikami spalinowymi nadal należą do głównych źródeł zanieczyszczenia środowiska naturalnego. W Unii Europejskiej transport ma ponad 60-procentowy udział w emisji tlenu węgla i tlenków azotu oraz około 25-procentowy udział w emisji dwutlenku węgla.

Aby jeszcze szerzej przedstawić czytelnikom problematykę emisji szkodliwych składników spalin, do bieżącego numeru kwartalnika dołączono płytę CD z materiałami Trzeciego Międzynarodowego Sympozjum Emisji Spalin, które odbyło się w dniach 24-25 maja 2012 r. w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej. Sympozjum to połączone było z obchodami 40-lecia działalności Instytutu BOSMAL, który jest bardzo zasłużoną jednostką dla polskiej motoryzacji. W Instytucie zrealizowano m.in. wiele prac badawczo-rozwojowych dotyczących silników polskiej i zagranicznej konstrukcji, ma on także bogaty wkład w badania emisji szkodliwych składników spalin. Z okazji jubileuszu Instytutu BOSMAL w bieżącym numerze zamieszczono wyniki kilku prac naukowych realizowanych aktualnie przez pracowników BOSMALu oraz krótki artykuł opisujący historię i osiągnięcia Instytutu.

Redakcja

Combustion Engines/Silniki Spalinowe

Contents/Spis treści

Editorials/Od Redakcji	1
<i>M. Weissbäck, M. Howlett, N. Ausserhofer, S. Krapf:</i> The efficiency engine – cost-effective alternative to downsizing/ <i>Wysokosprawny silnik – korzystna alternatywa dla downsizingu</i> (2012-SS2-101)	3
<i>P. Bielaczyc, J. Merkiż, P. Pajdowski, J. Woodburn:</i> Correlation between two commercially available PMP-compliant particle number counting systems/ <i>Korelacja wyników pomiaru liczby</i> <i>cząstek stałych za pomocą dwóch systemów zgodnych z wymaganiami</i> <i>protokołu PMP</i> (2012-SS2-102)	10
<i>K. Adamaszek, A. Suchecki, M. Wisła:</i> Valve steel oxidation rate in the exhaust gases of diesel engines fueled with 5% biocomponent diesel oil/ <i>Szybkość utleniania stali zaworowych w gazach</i> <i>spalinowych oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów</i> (2012-SS2-103)	22
<i>D. Łomankiewicz, K. Brodzik, P. Bielaczyc:</i> GC-MS/FID analysis of aldehyde and hydrocarbon emissions from exhaust gases of a spark ignition engine fueled with different ethanol-gasoline blends/ <i>Analiza emisji aldehydów i węglowodorów w spalinach</i> <i>silnika z zapłonem iskrowym zasilanego różnymi mieszankami</i> <i>benzyny z etanolem metodą GC-MS/FID</i> (2012-SS2-104)	30
<i>A. Gołda-Kopek, J. Faber, D. Łomankiewicz, K. Brodzik:</i> Investigation of volatile organic compounds in the cabin air of new cars/ <i>Badanie</i> <i>lotnych związków organicznych występujących w powietrzu</i> <i>z wnętrza kabin nowych samochodów</i> (2012-SS2-105)	39
<i>J. Faber, K. Brodzik, D. Łomankiewicz, A. Gołda-Kopek, J. Nowak,</i> <i>A. Świątek:</i> Temperature influence on air quality inside cabin of conditioned car/ <i>Wpływ temperatury na jakość powietrza</i> <i>wewnątrz kabiny samochodu kondycjonowanego</i> (2012-SS2-106)	49
<i>P. Bielaczyc, D. Klimkiewicz, A. Szczotka, J. Woodburn:</i> A comparison of the exhaust emission of a vehicle fuelled with different ethanol-petrol blends/ <i>Analiza porównawcza</i> <i>emisji związków szkodliwych spalin samochodu zasilanego</i> <i>różnymi mieszankami benzyny z etanolem</i> (2012-SS2-107)	57
<i>J. Keskinen, T. Rönkkö, P. Karjalainen, M. Happonen, P. Bielaczyc,</i> <i>R. Sala, J. Dzida, T. Kinnunen, P. Matilainen, M.E. Messing:</i> An evaluation of particle oxidation catalyst (POC) performance and a study of particle formation for sulphur containing diesel fuels/ <i>Badania charakterystyki pracy reaktora katalitycznego utleniającego</i> <i>cząstki stałe (POC) oraz zjawiska formowania się cząstek stałych</i> <i>dla olejów napędowych z różną zawartością siarki</i> (2012-SS2-108)	66
<i>E. Martini, N. Coghlan:</i> Emissions calibration yesterday, today and tomorrow/ <i>Kalibracja emisji wczoraj, dziś i jutro</i> (2012-SS2-109)	75
<i>A. Świątek:</i> BOSMAL – 40 years of automotive development/ <i>BOSMAL – 40 lat dla rozwoju motoryzacji</i>	83
<i>P. Bielaczyc, J. Woodburn:</i> Current and future trends in automotive emissions, fuels, lubricants and test methods – the view from the year 2012/ <i>Kierunki rozwoju metod ograniczania emisji szkodliwych</i> <i>składników spalin, metod badawczych oraz paliw i olejów</i> – stan na rok 2012	94
Books on combustion engines/ <i>Książki o silnikach spalinowych</i>	116

Editor/Wydawca

Polskie Towarzystwo Naukowe
Silników Spalinowych

43-300 Bielsko-Biała, ul. Sarni Stok 93, Polska
tel.: 33 8130402, fax: 33 8125038
E-mail: sekretariat@ptnss.pl
WebSite: <http://www.ptnss.pl>

The Publisher of this magazine does not endorse
the products or services advertised herein. The
published materials do not necessarily reflect the
views and opinions of the Publisher./*Redakcja nie*
ponosi odpowiedzialności za treść reklam i ogłoszeń.
Publikowane materiały i artykuły wyrażają poglądy
autorów, a nie Redakcji.

© Copyright by

Polish Scientific Society of Combustion Engines

All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced, stored in
a retrieval system or transmitted, photocopied or otherwi-
se without prior consent of the copyright holder.

Wszelkie prawa zastrzeżone.

*Żaden fragment tej publikacji nie może być reprodu-
kowany, zapamiętywany w systemie odtwarzalnym lub*
przetwarzany bądź kopiowany w jakiegokolwiek formie bez
wcześniejzedy zgydy właściciela praw wydawniczych.

Subscriptions/Prenumerata

Send subscription requests to the Publisher's address.
Cost of a single issue PLZ25 + postage and packing.
Zamówienia należy kierować na adres Wydawcy.
Cena numeru czasopisma wynosi 25 zł + koszty wysyłki.

Preparation for print/Przygotowanie do druku

ARS NOVA Publishing House/Wydawnictwo ARS NOVA
60-782 Poznań, ul. Grunwaldzka 17/10A

Circulation/Nakład: 650 egz.

Printing and binding/Druk i oprawa

Zakad Poligraficzny Moś i Łuczak, sp.j.
Poznań, ul. Piwna 1

This publication is co-financed by The Ministry
of Science and Higher Education./*Wydanie*
publikacji jest dofinansowane przez Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego.

Wydawnictwo rejestrowane
w bazie danych o zawartości
polskich czasopism technicznych



– BAZTECH www.baztech.icm.edu.pl

As recommended by the Ministry of Science and Higher Education,
the panel of associate paper reviewers will be listed in each year's last
issue of the magazine./*Zgodnie z zaleceniami Ministerstwa Nauki*
i Szkolnictwa Wyższego lista recenzentów współpracujących
publikowana będzie w ostatnim w danym roku numerze czasopisma.

Cover/Okladka

I – Ford EcoBoost 1.0 Engine (*fol. www.ford.com*),
background (© Sergej Khackimullin – *Fotolia.com*)
IV – BMW M Performance: three turbochargers
(*fol. www.press.bmwgroup.com*)

Publikacje naukowe drukowane w kwartalniku

Combustion Engines/Silniki Spalinowe

otrzymują 9 punktów

zgodnie z Komunikatem nr 16/2010 Ministra Nauki
i Szkolnictwa Wyższego z dnia 21 czerwca 2010 r.

The efficiency engine – cost-effective alternative to downsizing

As an alternative to the familiar option of downsizing diesel engines, AVL has developed the so-called efficiency engine in collaboration with Renault. Because of the engine's moderate power density, its peak pressure requirements are lower in some areas than those of turbocharged gasoline engines. Consequently, its mechanical friction and fuel consumption can be significantly reduced, as the comparison with a conventional and a downsized diesel engine demonstrates.

Key words: engine efficiency, fuel consumption, engine concepts, downsizing

Wysokosprawny silnik – korzystna alternatywa dla downsizingu

Firma AVL, przy współpracy z koncernem Renault, rozwinęła tzw. wysokosprawny silnik, jako rozwiązanie alternatywne dla znanej koncepcji downsizingu silników ZS. Z uwagi na umiarkowany objętościowy wskaźnik mocy silnika, maksymalne wartości ciśnienia w silniku są mniejsze w niektórych obszarach niż te dla turbodoładowanych silników ZI. W wyniku tego mogą być zmniejszone straty tarcia i zużycie paliwa, w porównaniu do konwencjonalnych i poddanych procesowi downsizingu silników ZS.

Słowa kluczowe: sprawność silnika, zużycie paliwa, koncepcje silników, downsizing

1. Reduced friction and fuel consumption

Reduction of fuel consumption and costs dominate the future market requirements in drive train development. Alongside electrification, downsizing concepts currently play a major role in CO₂ reduction. However, this route means a further cost increase for the diesel engine in order to offer acceptable performance in heavy vehicles using engines with reduced displacement. Main cost drivers are the modified fuel injection and boosting-system for increased specific power density as well as the higher efficiency requirement for the NO_x aftertreatment system. An attractive alternative to a classical downsizing concept is an efficiency-engine concept, optimized for a more moderate power density and minimized frictional losses. In this case, instead of reducing swept volume, the specific power density is reduced to 45 kW/l in the first generation, thus covering the needs of the high volume market. For this moderate power density the required peak firing pressure is reduced to a value even lower than those of some turbocharged gasoline engines. With a consequent modular redefinition of the crank train the friction can be significantly reduced, achieving a CO₂ reduction corresponding to a swept volume reduction by 20 to 25%. In this paper the details of such an efficiency engine concept (DDE: Derated Diesel Engine) will be discussed in comparison to a typical downsizing concept (ADD: Aggressive Downsized Diesel) [1].

2. Selection of engine swept volume versus power density

In this article the selection of engine size for a given vehicle definition is made considering different driving cycles since the NEDC (New European Driving Cycle) will be replaced by the WLTP (Worldwide Harmonized

1. Zmniejszone straty tarcia i zużycie paliwa

Redukcja zużycia paliwa i zmniejszenie kosztów dominują jako przyszłe wymagania rynkowe w rozwoju zespołu napędowego. Obok zastosowania napędów elektrycznych, koncepcje bazujące na downsizingu silnika odgrywają główną rolę w redukcji emisji CO₂. To jednak oznacza dalszy wzrost kosztów dla silnika ZS w celu zaoferowania akceptowalnych osiągnięć dla silników pojazdów HDV o zredukowanej objętości skokowej. Głównymi czynnikami decydującymi o kosztach są zmodyfikowany wtrysk paliwa i system doładowania, niezbędne dla zwiększonej jednostkowej mocy użytecznej, jak również większe wymagania w zakresie skuteczności redukcji katalitycznej NO_x.

Atrakcyjną alternatywą dla klasycznej koncepcji downsizingu jest koncepcja wysokosprawnego silnika, zoptymalizowanego dla bardziej umiarkowanego zapotrzebowania na moc i o zminimalizowanych stratach tarcia. W tym przypadku zamiast redukcji objętości skokowej, obniżono stopień wysilenia silnika (objętościowy wskaźnik mocy) do wartości 45 kW/dm³ dla pierwszej generacji, co pokrywa zapotrzebowania rynku pojazdów typu HDV. Dla tego umiarkowanego wysilenia, wymagane maksymalne ciśnienie spalania jest zmniejszone nawet do wartości mniejszej niż uzyskiwana dla niektórych turbodoładowanych silników ZI. Przez zaprojektowanie nowego układu korbowo-tłokowego można zmniejszyć znacząco straty tarcia, uzyskując zmniejszenie emisji CO₂ odpowiadające redukcji objętości skokowej o 20 – 25%. W pracy przeanalizowano szczegóły koncepcji wysokosprawnego silnika (DDE – *Derated Diesel Engine*) na tle typowej koncepcji downsizingu silnika ZS (ADD – *Aggressive Downsized Diesel*) [1].

Light Vehicles Test Procedure) cycle. The final definition of the new cycle was not available at the time this paper was written, so a test procedure with more focus on higher load and considering more transients than the NEDC was defined for the simulations, thus covering the expected trend for the new cycle definition. The comparison starts with the internally named F9Q 1.9 l engine which was quite typical for this vehicle class (Renault Laguna) in the recent past. The DDE efficiency engine is based on a Renault K9K engine (1.46 l) as described in detail in the next chapter, while the downsizing concept (ADD) is represented by a 1.05 l three-cylinder engine with 80 kW. This downsizing concept was also defined for Renault and has already been presented in detail in a publication [2].

The results of this comparative vehicle simulation can be seen in Fig. 1. The already existing K9K with 1.46 l swept volume serves as base for this relative comparison. All listed percentage changes relate to this engine size. In Fig. 1 (top left) the NEDC results are listed. Applying the efficiency engine with reduced friction, the fuel consumption can be reduced by 5.3% while soot and NO_x emissions are reduced by 4.3 or 6.1% respectively while keeping the swept volume constant. With the 1.05 l engine the fuel consumption decreases by 8.2% while NO_x and soot emissions increase

2. Wybór objętości skokowej silnika a objętościowy wskaźnik mocy

W niniejszej pracy przedstawiono wybór parametrów geometrycznych silnika dla danej kategorii pojazdu, rozważając różne cykle jezdne, ponieważ cykl NEDC (*New European Driving Cycle*) będzie zastąpiony testem WLTP (*Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure*). Ostateczny kształt nowego testu nie był znany w czasie, kiedy pisano niniejszą pracę. Opracowano zatem własny test, obejmujący w większym stopniu wysokie obciążenia i niestacjonarne warunki pracy niż test NEDC, odpowiadający przewidywanym trendom, które będą uwzględnione we wspomnianym nowym teście. Do analizy porównawczej wytypowano konwencjonalny silnik o pojemności 1,9 dm³, oznaczony F9Q, stosowany w pojazdach klasy Renault Laguna, wysokosprawny silnik DDE oparty na konstrukcji silnika Renault K9K (objętość skokowa 1,46 dm³), którego opis szczegółowy zamieszczono w następnym rozdziale, oraz silnik będący efektem downsizingu (ADD) – trzycylindrowy silnik o objętości skokowej 1,05 dm³ i mocy 80 kW. Wspomniany silnik wykorzystujący koncepcję downsizingu jest również efektem prac Renault, a szczegółowe informacje na jego temat przedstawiono w pracy [2].

Symulacyjne porównanie parametrów pojazdu wyposażonego w każdy z wymienionych wyżej silników przedstawiono na rysunku 1. Bazę do porównań stanowi istniejący silnik K9K o pojemności 1,46 dm³. Wszystkie przedstawione procentowe zmiany parametrów odnoszą się do osiągnięć tego silnika.

Na lewym górnym wykresie zaprezentowano wyniki w teście NEDC. Stosując wysokosprawny silnik ze zmniejszonymi stratami tarcia, zużycie paliwa można zredukować o 5,3%, podczas gdy emisję sadzy i NO_x odpowiednio o 4,3% i 6,1%, przy stałej wartości objętości skokowej silnika. Dla silnika o pojemności 1,05 dm³ uzyskuje się zmniejszenie zużycia paliwa o 8,2%, podczas gdy emisja NO_x i sadzy wzrasta znacząco z uwagi na zmianę obszaru pracy silnika, pomimo zastosowania emisyjnie zoptymalizowanej strategii spalania w obszarze wyższych obciążeń, uwzględniającej niskociśnieniowy EGR [3].

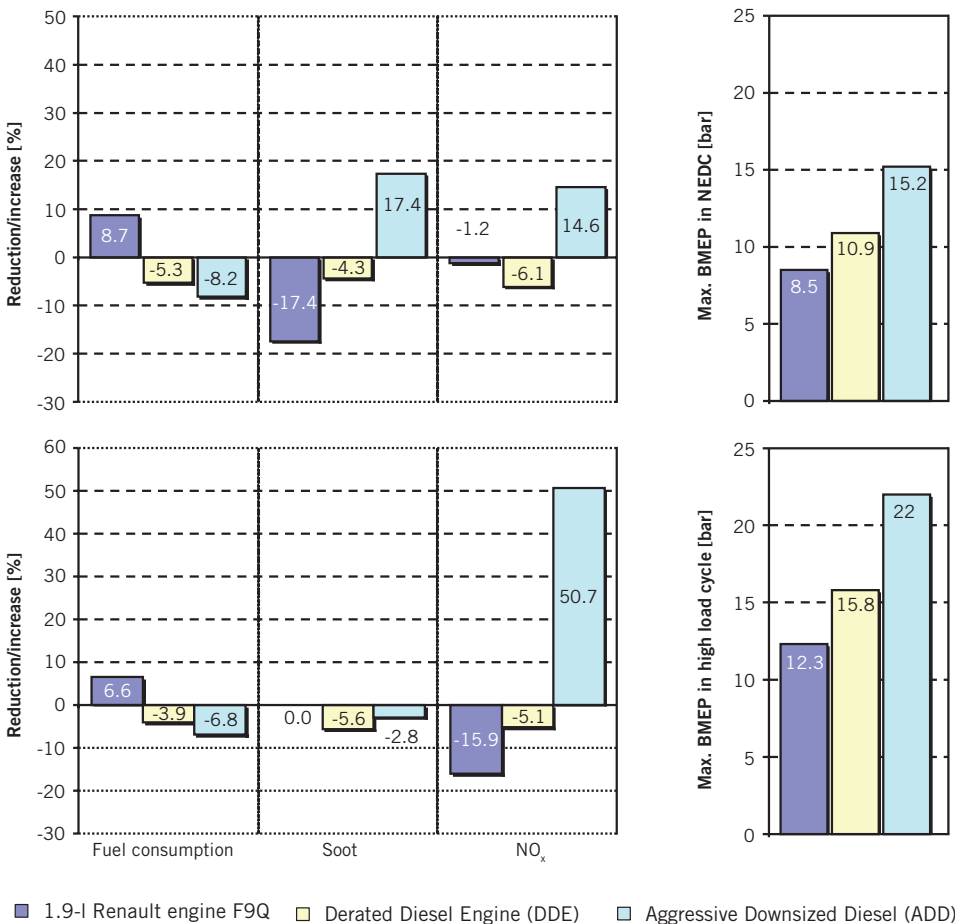


Fig. 1. Engine concept comparison in the New European Driving Cycle (top) and in the higher loaded driving cycle (bottom)

Rys. 1. Porównanie wskaźników pojazdu wyposażonego w silniki różnej koncepcji w teście NEDC (górny wykres) i teście wysokich obciążeń (dolny wykres)

significantly due to the shifting of the operation area. An emission optimized combustion strategy in the higher load area considering low pressure EGR [3] is already considered in this concept. In Fig. 1 (bottom) the simulation results for the higher loaded driving cycle are plotted. A significant increase in NO_x emissions and deterioration of the NO_x /soot trade-off can be seen at first glance while showing otherwise quite similar trends. This is due to the different characteristics of the driving cycles. The average power required for the given vehicle model amounts to 4.24 kW in the NEDC, while the value for the assumed future driving cycle goes up to 9.26 kW, around double the value. The maximum engine load in the NEDC reaches 15.2 bar BMEP, while up to 22 bar are required in the high loaded cycle. These results collectively clearly indicate that aggressive downsizing concepts have to be seen critically in view of new, higher loaded driving profiles. At the same time it is seen that the efficiency engine can be an attractive approach not only in view of system costs.

3. Prototype implementation of efficiency engine

Having defined the system requirements, the next step towards engine hardware was to define the basic engine architecture and dimensions. Here a systematic approach, supported by experience (benchmarking) and simulation tools is applied to ensure that the system level targets are fulfilled. For the efficiency engine the focus was on minimizing the frictional losses from the cranktrain and the parasitic losses from oil and water pumps. The defined peak firing pressure for the DDE concept is only 110 bar; the gas forces are hence 30 to 40% lower than a typical state of the art Euro 5 diesel engine. A careful redesign of the complete cranktrain according to the lower loads was performed, tab. 1. Significant benefits are realized in terms of reduced mass and friction. At the pistons, the lower gas forces allow a reduction of piston pin diameter from 26 to 20 mm. A reduction in wall thickness below the combustion bowl and the elimination of the piston cooling gallery due to the moderate specific power together permit a reduction in piston compression height to only 48% of the cylinder bore without requiring bearing bushes in the piston. The lower gas forces also allow a reduction in heights and tensions of the piston rings to a level more familiar from gasoline engines with corresponding reduction of friction. The small end of the connecting rod is redesigned to the reduced pin diameter and the shank cross-section adapted to the lower gas load. The big end is also reduced to suit the optimized crankpin diameter. The lower piston height allows an increase in conrod length of 5.25 mm which gives an additional friction benefit due to the reduction of side forces at the piston-liner interface. Nevertheless the weight of the conrod assembly was reduced by nearly 25%. The application of cost-intensive sputter bearings at the big end could be avoided. At the crankshaft, the focus is on minimization of diameters of the main and crankpin bearings. In the first step, parameter variation was performed using FEM analysis of a single crankweb, based on a metric of bending deflection under gas load. The new layout was compared to a wide range of proven designs based on this

Na rysunku 1 (dolny wykres) przedstawiono wyniki symulacji dla własnego cyklu jezdnyego wysokich obciążeń. Można zauważyć wzrost emisji NO_x i pogorszenie wskaźnika NO_x /sadza. Powyższe zjawisko wynika z różnych charakterystyk cykli jezdnych. Średnia moc wymagana dla danego modelu pojazdu wynosi 4,24 kW w teście NEDC, podczas gdy we własnym teście wysokich obciążeń dochodzi do 9,26 kW. Maksymalne obciążenie silnika w teście NEDC, wyrażone jako średnie ciśnienie użyteczne, osiąga wartość 15,2 bar, a dla testu wysokich obciążeń dochodzi aż do 22 bar. Powyższe wyniki wskazują, że koncepcje agresywnego downsizingu muszą być poddane krytycznej ocenie z punktu widzenia nowych cykli jezdnych o wyższych obciążeniach niż w teście NEDC. Jednocześnie można zauważyć, iż wysokosprawny silnik może stanowić atrakcyjne rozwiązanie nie tylko ze względu na małe koszty systemu.

3. Prototypowa implementacja wysokosprawnego silnika

Dysponując zdefiniowanymi wymaganiami dla systemu, jako następny krok w budowie silnika określono architekturę i wymiary silnika. W tym celu zastosowano metodyczne podejście, wspomagane przez narzędzia empiryczne i symulacyjne, aby zapewnić zrealizowanie założonych celów dla systemu. W przypadku wysokosprawnego silnika istotne było zminimalizowanie strat tarcia w układzie korbowo-tłokowym i strat pomp oleju i cieczy chłodzącej.



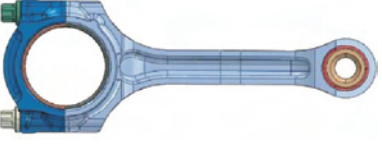
Zdefiniowana wartość maksymalna ciśnienia spalania dla koncepcji DDE wynosi jedynie 110 bar, stąd siły gazowe są o 30 – 40% mniejsze niż dla typowych współczesnych rozwiązań silników ZS klasy Euro 5. Z uwagi na wymienione mniejsze obciążenia, od nowa zaprojektowano układ korbowo-tłokowy tego silnika (tab. 1). Znaczące korzyści uzyskano dzięki redukcji masy i strat tarcia.

W odniesieniu do tłoków, mniejsze siły gazowe umożliwiają zmniejszenie średnicy sworznia tłokowego z 26 mm do 20 mm. Redukcja grubości ścianki poniżej komory spalania i eliminacja chłodzenia tłoka z powodu zmniejszonych wartości mocy użytecznej pozwalają na redukcję wysokości sprężania do jedynie 48% średnicy cylindra bez konieczności stosowania łożysk ślizgowych w tłoku.

Mniejsze siły gazowe umożliwiają ponadto zmniejszenie wysokości i naprężeń pierścieni tłokowych do poziomu bliskiego wartościom uzyskiwanym w silnikach ZI, wraz z odpowiadającą redukcją strat tarcia.

Głowa korbowodu jest zaprojektowana dla zredukowanej średnicy sworznia tłokowego, a przekrój poprzeczny trzonka zaadoptowany do mniejszych wartości obciążenia. Stopa korbowodu jest również zmodyfikowana dla właściwego połączenia ze zoptymalizowanym czopem korbowym. Mniejsza wysokość tłoka umożliwia wzrost długości korbowodu o 5,25 mm, co daje dodatkowe korzyści w zakresie tarcia, wynikające z redukcji bocznych sił na powierzchni tulei cylindrowej. Ciężar zespołu korbowodu zmniejszono o prawie 25%. Nie było również konieczne stosowanie kosztownych napylanych łożysk ślizgowych.

Table 1. Dimensions of cranktrain components
Tabela 1. Wymiary geometryczne elementów układu korbowo-tokowego

		Basis/ rozwiązanie bazowe	DDE	
Crankshaft/wał korbowy				
Main journal diameter/średnica czopa głównego	mm	48	41	
Main journal width/szerokość czopa głównego	mm	25	25	
Crank pin diameter/średnica czopa korbowego	mm	44	40	
Crank pin width/szerokość czopa korbowego	mm	22.2	24	
Weight/masa	kg	10.2	9.2	
Piston assembly/zespół tłoka				
Piston pin diameter/średnica sworznia	mm	26	20	
Compression height (KH)/wysokość sprężania	mm	41.75	36.5	
Współczynnik KH/D	%	54.9	48	
Piston cooling/chłodzenie tłoka	–	Gallery/magistrala	Undercrown/wewnętrzne korony tłoka	
First piston ring height/wysokość pierwszego pierścienia	mm	2	1.5	
Second piston ring height/wysokość drugiego pierścienia	mm	2	1.5	
Third piston ring height/wysokość trzeciego pierścienia	mm	2.5	2	
Weight/masa	g	603	457	
Connecting rod assembly/zespół korbowodu				
Współczynnik λ	–	0.301	0.289	
Manufacturing process/proces wytwarzania	–	Forged/kucie	Sinter forged/spiekanie i kucie	
Weight/masa	g	578	442	

metric. The resulting layout was then validated using the full 3D Multi-Body-Simulation and Finite Element capabilities of AVL Excite, including elasto-hydrodynamic simulation of the bearings. It is noted that the crankshaft design is here limited by its stiffness – and hence the edge-loading of the main bearings – and not directly by the material fatigue strength as was the case for the ADD concept [2]. Including the proportional reduction of the counterweights, an overall saving in cranktrain mass of around 10 % was achieved. The friction benefit of each of the measures described above was assessed individually with the help of simulation tools, Fig. 2. The predicted reduction of 0.15 bar at 2000 rpm compares very well with the strip-down measurements which have been performed with modified engine hardware based on the K9K engine. For further refinement of the friction prediction capabilities in future, AVL has developed a new one cylinder research engine which can measure frictional forces in the piston-liner interface under operating conditions up to 140 bar cylinder pressure and 4000 rpm engine speed, Fig. 3. Since the mechanical loads on the DDE are comparable to

Odnośnie do wału korbowego, skupiono się na zmniejszeniu średnicy łożysk głównych i korbowodowych. Przede wszystkim analizowano zmiany parametrów pojedynczego ramienia wykorbienia z zastosowaniem metody elementów skończonych, bazując na strzałce ugięcia od zginania wskutek siły gazowej. Nowe rozwiązanie porównano do wcześniejszych sprawdzonych konstrukcji. Wynikowa konstrukcja była następnie poddana ocenie technicznej z zastosowaniem AVL Excite w obszarze pełnej trójwymiarowej symulacji i metody elementów skończonych, z uwzględnieniem elasto-hydrodynamicznej symulacji łożysk. Należy zauważyć, iż konstrukcja wału korbowego jest ograniczona jego sztywnością – i stąd obciążeniem brzegowym łożysk głównych, a pośrednio przez wytrzymałość zmęczeniową materiału, jak to miało też miejsce w przypadku koncepcji ADD [2]. Włączając proporcjonalne zmniejszenie masy przeciwcieżarów, uzyskano całkowite zmniejszenie masy zespołu korbowego o 10%.

Korzyści w obszarze strat tarcia każdego z opisanych rozwiązań oceniono indywidualnie z zastosowaniem narzę-

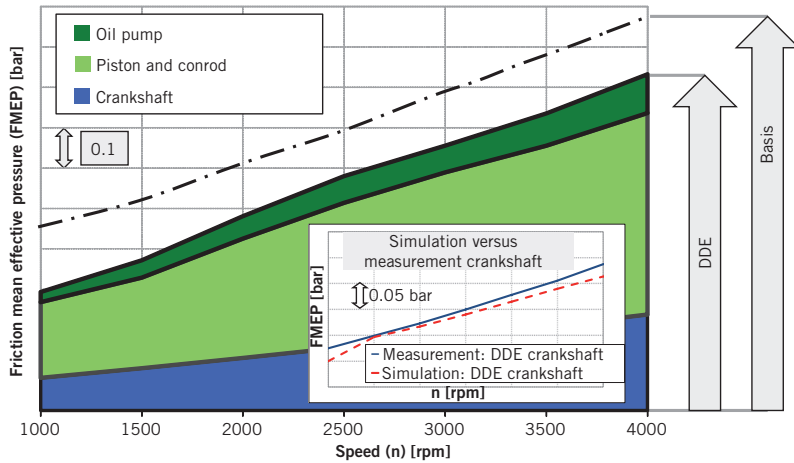


Fig. 2. Friction measurement and friction simulation

Rys. 2. Przebiegi zmian średniego ciśnienia tarcia uzyskane w badaniach empirycznych i symulacyjnych

dzia symulacyjnego (rys. 2). Przewidywane zmniejszenie ciśnienia tarcia o 0,15 bar dla $n = 2000$ obr/min jest porównywalne z dolnopasmowymi pomiarami przeprowadzonymi dla zmodyfikowanej konstrukcji silnika opartego na silniku K9K. W celu dalszego doskonalenia prognozowania zmian sił tarcia w przyszłości firma AVL skonstruowała jednocylindrowy silnik badawczy, w którym możliwy jest pomiar sił tarcia na powierzchni tulei cylindrowej aż do warunków pracy odpowiadających ciśnieniu w cylindrze równemu 140 bar i prędkości obrotowej silnika równej 4000 obr/min. (rys. 3). Z uwagi na to, iż obciążenia mechaniczne dla silnika DDE są porównywalne do wysiłonych turbodoładowanych silników GDI, koncepcja wpisuje się dobrze w rodzinę modułowych silników

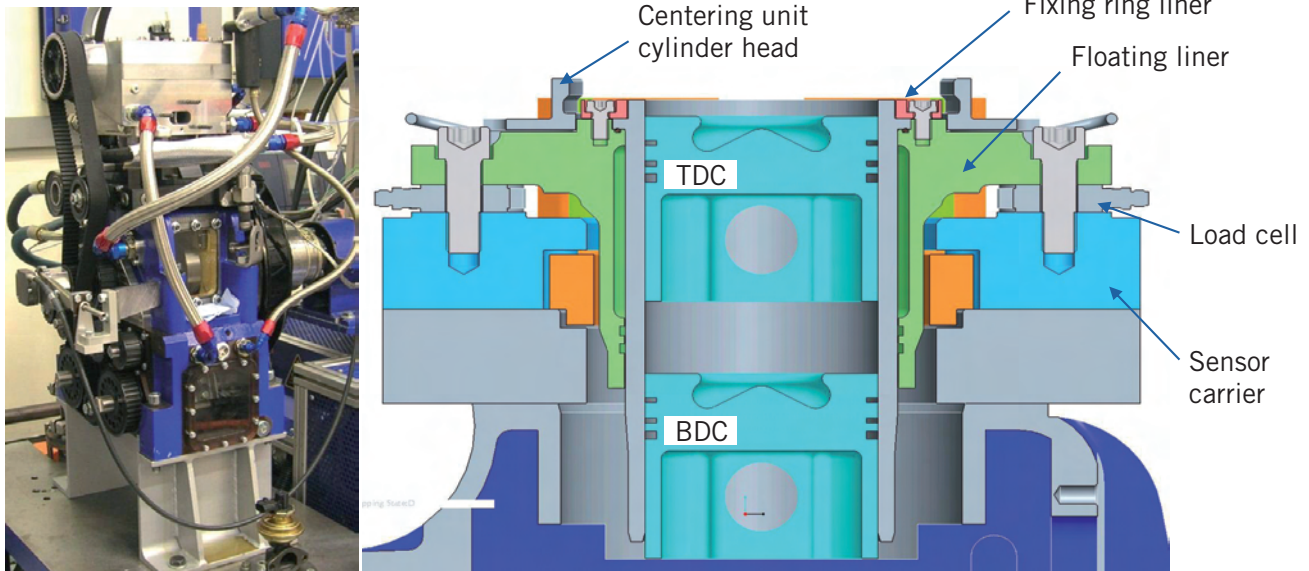


Fig. 3. Research engine for friction development

Rys. 3. Stanowisko do badań procesów tarcia w silniku

a high performance turbocharged GDI engine, the concept fits well to a modular engine family line-up with common components and production facilities for diesel and gasoline variants [4].

4. Measurement results

After completion of the friction strip-down measurements, the efficiency engine was installed on the development testbed. In Figure 4 the part-load traces for 2000 rpm are plotted. In the reference points at 2 bar BMEP an excellent brake specific fuel consumption below 290 g/kWh in combination with attractive NO_x figures has already been achieved after a very short development period. At higher load areas the benefit in specific fuel consumption is reduced because the internal engine friction is not as dominant anymore. Compared to the scatter bands in grey color the excellent trade-off between fuel efficiency and NO_x emission is evident. For

ze wspólnymi elementami i urządzeniami produkcyjnymi dla wariantów silników ZS i ZI [4].

4. Wyniki pomiarów

Po ukończeniu pomiarów podstawowych w obszarze strat tarcia, na stanowisku badawczym zamontowano wysokosprawny silnik. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi dla obciążeń częściowych i prędkości obrotowej silnika 2000 obr/min. Przy wartości średniego ciśnienia użytecznego 2 bar uzyskano korzystne wartości emisji NO_x i jednostkowego zużycia paliwa (poniżej 290 g/kWh) już po krótkim okresie badań. Dla obszarów pracy silnika przy wyższych obciążeniach korzyści dotyczące jednostkowego zużycia paliwa są mniejsze z uwagi na mniejsze znaczenie tarcia wewnętrznego w silniku. W porównaniu do obszarów rozrzutu (o szarym kolorze) widać bardzo korzystne zmniejszenie zużycia paliwa i emisji NO_x . Dalszą redukcję zużycia paliwa

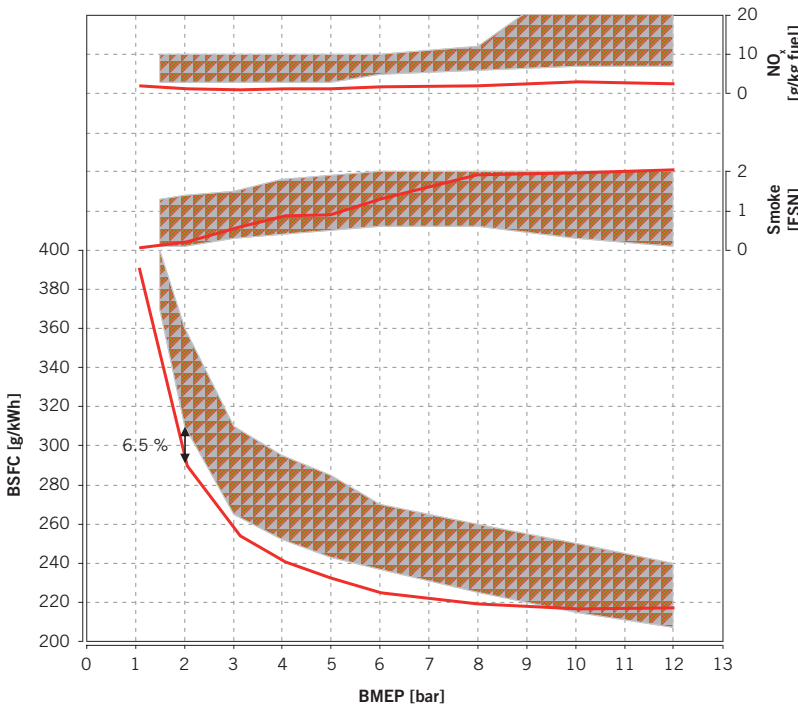


Fig. 4. Part load traces efficiency engine at 2000 rpm

Rys. 4. Przebiegi zmian parametrów wysokosprawnego silnika dla obciążeń częściowych i n = 2000 obr/min

future developments, a further fuel consumption potential is seen by shooting for somewhat higher NO_x emissions, assuming that NO_x aftertreatment will be the main route for the Euro 6 fleet. For future planned vehicle application it can be assumed based on these early results that similarly attractive fuel efficiency figures as with a downsizing concept can be achieved; however with clearly reduced system costs.

5. Summary and outlook

With the derating approach (efficiency engine) also benefits with respect to system costs and complexity can be seen. The efforts for boosting, fuel injection system and NO_x aftertreatment are significantly reduced. This cost effective engine has the potential for highest production figures due to global market chances, thus offering additional benefits in the cost

można uzyskać przez dopuszczenie nieco większej silnikowej emisji NO_x, zakładając, że pozasilnikowe systemy oczyszczania spalin z NO_x będą głównymi rozwiązaniami stosowanymi dla floty pojazdów spełniających normę Euro 6. Dla przyszłej planowanej aplikacji pojazdu można założyć, opierając się na wstępnych wynikach badań, iż, podobnie jak dla koncepcji downsizingu, można uzyskać korzystne zużycie paliwa, jednakże przy mniejszych kosztach systemu.

5. Podsumowanie i perspektywy rozwoju

W przypadku rozwiązania o mniejszych wartościach znamionowych parametrów silnika (silnik o wyższej sprawności) dostrzega się korzyści w zakresie kosztów systemu i jego mniejsze skomplikowanie. Zmniejszono znacząco wymagania w odniesieniu do systemu doładowania, układu zasilania i pozasilnikowego systemu oczyszczania spalin z NO_x. Powyższy, wydajny ekonomicznie silnik może być szeroko stosowany w produkcji z uwagi na możliwości światowego rynku. Nabywca będzie zadowolony z obniżonych kosztów obsługi i ze zwiększonego komfortu w porównaniu do koncepcji trzycylindrowego silnika, w którym uwzględniono proces downsizingu.

Opisany program obniżania wartości znamionowych parametrów silnika prowadzono przy współpracy z firmą

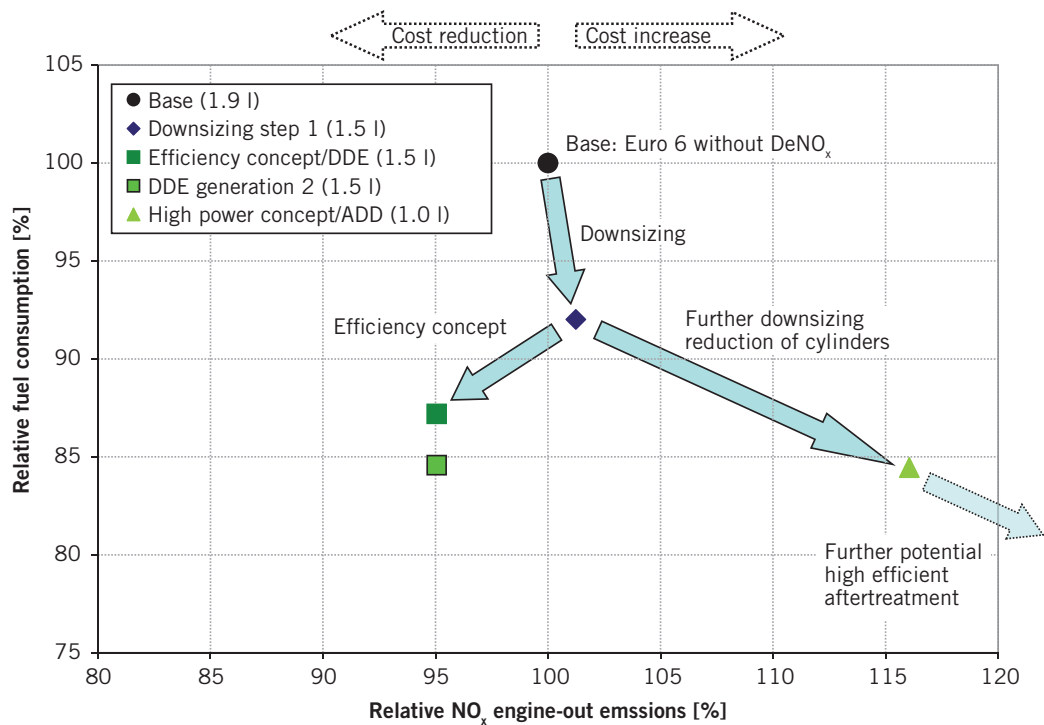


Fig. 5. Concept comparison with respect to NO_x and fuel efficiency

Rys. 5. Porównanie różnych koncepcji silników pod względem emisji NO_x i zużycia paliwa

structure. The customer will enjoy reduced maintenance costs and improved comfort compared to a three-cylinder downsizing concept. This derating program has been performed in close cooperation with Renault, taking the existing 1.46 l K9K engine as base. In the derating program production boundaries of the existing facilities had to be considered; additional potential for the efficiency engine could be found if more freedom is available when defining a new engine family from scratch. Figure 5 summarizes the results collected. Downsizing promises lowest CO₂ values when combined with a high efficiency NO_x aftertreatment system. Current development is focussed on independent systems providing attractive reduction potential in an extended operation area. The biggest challenges at the moment are the system costs and further increased complexity. The efficiency/derating concept currently offers an attractive solution for the cost sensitive high volume market combining improved fuel economy with system simplification and potential cost reduction, at the same time offering an attractive base for hybridisation.

Acknowledgements

Special Thanks to Mr. Philippe Mallet and Mr. Karim Ben-Cherif from Renault for their consistent support of the program. Further thanks to the colleagues Peter Gutmann, Ludwig Bürgler, Wolfgang Schnider and Bernhard Enzi.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Artykuł w języku angielskim został także opublikowany w MTZ nr 12/2011.

Renault, biorąc jako podstawę do badań silnik K9K o pojemności 1,46 dm³. W programie wytwarzania bazującym na obniżaniu parametrów znamionowych silnika należy rozważyć granice obecnych systemów. Dodatkowy potencjał dla wysokosprawnego silnika może się pojawić, gdy dojdzie do tworzenia rodzin silników. Na rysunku 5 przedstawiono sumaryczne zestawienie uzyskanych wyników. Zastosowanie procesu downsizingu w silniku zapewnia najmniejsze wartości emisji CO₂, gdy wraz z tym procesem zastosuje się systemy pozasilnikowej redukcji NO_x o dużej sprawności konwersji.

Obecny rozwój konstrukcji jest skupiony na niezależnych systemach zapewniających możliwości redukcji w rozszerzonych obszarach pracy silnika. Największe obecne wyzwania dotyczą kosztów systemu i jego dalej rosnącego skomplikowania. Obecnie koncepcja wysokosprawnego silnika (o zmniejszonych parametrach znamionowych) stanowi korzystne rozwiązanie dla wrażliwego cenowo rynku, łącząc poprawę zużycia paliwa z prostotą systemu i potencjalnym zmniejszeniem kosztów, przy jednoczesnym zapewnieniu korzystnej podstawy do zastosowania napędu hybrydowego.

Podziękowania

Autorzy dziękują Panom: Philippe Mallet i Karim Ben-Cherif z firmy Renault za wsparcie programu badań. Wyrazy podziękowania składają również współpracownikom: Peterowi Gutmannowi, Ludwigowi Bürglerowi, Wolfgangowi Schneiderowi i Bernardowi Enzi.

Bibliography/Literatura

- [1] Weissbaeck M., Sorger H., Zieher F., Howlett M., Krapf S., Gutmann P.: Der Dieselmotor der Zukunft: Auslegung und Ergebnisse – Ausführungsbeispiele unter Berücksichtigung von Produktionsrandbedingungen. 19. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2010.
- [2] Sorger H., Howlett M., Schnider W., Ausserhofer, N., Bartsch P., Weissbaeck M., Soustelle O.; Ragot, P.; Mallet, Ph.: The CO₂ Challenge: Aggressive Downsizing for HSDI Diesel – Engine Concept Definition. 31. Internationales Wiener Motorensymposium, 2010.
- [3] Weissbaeck M., Bürgler L., Gutmann P.: Entwicklungstrends für den zukünftigen PKW Diesel Motor. 8. Dresdner Motorenkolloquium, 2009.
- [4] Sorger H., Schoeffmann W., Howlett M.: The Internal Combustion Engine as Key Component. In: MTZ 72 (2011), No. 3.

Michael Weissbäck, Eng. – Deputy Vice President Passenger Car Diesel at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Inż. Michael Weissbäck – zastępca dyrektora ds. samochodów osobowych z silnikami ZS w AVL List GmbH, Graz, Austria.



Norbert Ausserhofer, Eng. – Lead Engineer Valve and Timing Drive Systems at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Inż. Norbert Ausserhofer – Główny inżynier ds. układów rozrządu silników w AVL List GmbH, Graz, Austria.



Mike Howlett, Eng. – Lead Engineer Passenger Car Engine Design at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Inż. Mike Howlett – Główny inżynier ds. konstrukcji silników do samochodów osobowych w AVL List GmbH, Graz, Austria.



Stefan Krapf, Eng. – Senior Project Manager at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Inż. Stefan Krapf – Główny kierownik projektu w AVL List GmbH, Graz, Austria.



Correlation between two commercially available PMP-compliant particle number counting systems

As a result of increased concern over the toxicological effects of particulate matter (PM) emitted by compression ignition vehicles, the European Union (EU) has introduced a particle number (PN) limit. This represents a significant departure from the traditional gravimetric approach of quantifying PM emissions, and introduces unique challenges to the automotive testing process. The legislation sets certain limits and guidelines for systems designed to quantify particle number emissions, but the legislation currently has some flexibility regarding system layout, operating temperatures, etc. In this work, two commercially available particle counting systems were tested with a variety of Euro 5 light-duty CI vehicles equipped with particulate filters (DPFs). The results indicate a small but reasonably consistent discrepancy between the two systems, with a mean difference of 9.3%. Possible causes of this difference (which was not observed in all cases) are discussed in the context of the current EU light-duty CI PN limit, and possibilities for future research directions are suggested.

Key words: exhaust emission, particulate matter, PMP-compliant

Korelacja wyników pomiaru liczby cząstek stałych za pomocą dwóch systemów zgodnych z wymaganiami protokołu PMP

Jako rezultat rosnącego zainteresowania toksycznymi właściwościami cząstek stałych (PM) emitowanych z silników o zapłonie samoczynnym, Unia Europejska wprowadziła dodatkowe limity dotyczące liczby emitowanych cząstek stałych (PN). Metodyka pomiaru ilości emitowanych cząstek różni się znacznie od tradycyjnego wagowego pomiaru emisji PM i wprowadza nową, unikalną procedurę pomiarową do znanych metod badania emisji związków szkodliwych spalin. Przepisy prawne wprowadziły limity dotyczące liczby emitowanych cząstek i wymagania dotyczące konstrukcji układu pomiarowego do określania tej liczby – te nowo wprowadzone przepisy cechuje pewna elastyczność w zestawieniu aparatury pomiarowej, temperatury pomiaru i innych parametrów.

W artykule opisano porównanie wyników pomiarów liczby cząstek stałych uzyskanych przy użyciu dwu systemów pomiarowych, pochodzących od różnych producentów, przy badaniu wielu samochodów z silnikami ZS, spełniających wymagania Euro 5 i wyposażonych w filtry cząstek stałych (DPF). Uzyskane wyniki pokazały nieduże, lecz jednak znaczące różnice w liczbach cząstek zmierzonych przy użyciu obu przyrządów – do około 9,3%. Możliwe przyczyny tych różnic (które jednak nie występują przy każdym pomiarze) przedstawiono i omówiono w kontekście obecnie obowiązujących limitów PN dla silników ZS w przepisach Unii Europejskiej. Zaproponowano również zakres dalszych analiz dotyczących tego problemu badawczego i planowanych do przeprowadzenia.

Słowa kluczowe: emisja spalin, cząstki stałe, protokół PMP

1. Introduction

The compression ignition (CI) engine has become an increasingly common feature of light-duty vehicles over the past few decades. However, the increasing popularity of this engine type has been paralleled by growing concern over particulate matter (PM) emitted from vehicles featuring this type of engine. In urban settings, light- and heavy-duty road vehicles with CI engines are responsible for a large proportion of the anthropogenic PM load, and their mass-based PM emissions have been restricted in the EU since 1992. From the Euro 1 standard to the Euro 5 standard, the gravimetric PM limit was reduced > 95%, to a point where accurate quantification became difficult, as the legislative limit approached the detection limit for the specified method. Toxicological studies have revealed that health effects are more closely related to particle number and surface area

1. Wprowadzenie

W ostatnich kilku dekadach obserwowano znaczący wzrost udziału silników o zapłonie samoczynnym (ZS) we flocie samochodów osobowych na drogach Unii Europejskiej. Zwiększenie udziału silników ZS spowodowało zwiększenie emisji cząstek stałych (PM) z samochodów wyposażonych w te silniki. Zarówno samochody osobowe, jak i ciężarowe z silnikami ZS mają znaczący udział w antropologicznym zanieczyszczeniu środowiska cząstkami stałymi, dlatego od 1992 r. ich emisja jest limitowana w krajach Unii Europejskiej. W stosunku do normy Euro 1 dopuszczalna emisja cząstek stałych jest zmniejszona w normie Euro 5 o ponad 95%. Dokładne określenie emisji cząstek staje się trudne, ponieważ dopuszczalne wartości ustalone w przepisach zbliżyły się do granicy wykrywalności. Ze studiów literaturowych wynika, że liczba cząstek stałych

(∞ diameter) than mass. As a result of these two factors, a particle number limit was introduced in Euro 5+ legislation for CI engines. This emissions limit represents a significant departure from previous requirements, as the measurement technique is fundamentally different from the methods employed to quantify gaseous and PM mass emissions.

Condensation particle counters (CPCs) have been used in a variety of applications for some time to monitor real-time, total or mean particle counts from various sources. In response to the upcoming requirement, multiple manufacturers of automotive emissions testing equipment began to market PMP-compliant particle counting systems suitable for testing light-duty vehicles for conformity with the demands of [1] and [2]. In addition to legislative requirements, particle counting systems are essential pieces of equipment for assessing the performance of PM aftertreatment systems (Diesel particulate filters, DPFs) for research and development work, as the gravimetric PM technique is insufficiently sensitive to distinguish between DPF-filtered PM emissions in most cases [3, 4]. Moreover, the gravimetric PM limit and the PN limit are not equivalent, the PN limit being considerably more stringent, thereby making particle counting the critical research metric for CI engines and aftertreatment systems [3].

Due to the relative paucity of data on correlations between the results generated by these devices, an experimental programme was carried out to assess the agreement between the two systems when tested in parallel.

A vehicle which emits particles at the Euro 5+ limit of 6.00×10^{11} #/km will emit a total of around 6.60×10^{12} particles over the duration of the NEDC, corresponding to a mean emission factor of hundreds of millions of particles for each metre of the cycle. Thus, particle number emissions are best represented as exponentials, to no more than two decimal places, as the figures involved are many orders of magnitude larger than other parameters commonly encountered in automotive emissions testing.

2. Particle counting systems tested

As the focus of this study was the performance of two similar but distinct systems, attention should be drawn to the operational specifics of the two systems. Selected data of the two particle counting systems employed are presented in Table 1.

The operating and quantification principal of the two systems is identical. A size-selective sample is taken from the dilution tunnel, heated and diluted, treated at high temperature to evaporate volatiles (non-solid phase particles), further diluted and cooled, and then drawn into the condensation particle counter unit. Here the sample is dosed with small quantity of butanol, which condenses onto the particles present to increase their size and ensure detection. A closely controlled volume of the sample is passed through a laser beam. The laser beam's interruption is detected using a series of lenses and a photometer, which generates a signal indicating particle detection. Both systems feature mathematical coincidence correction to

i ich powierzchnia (określona na podstawie ich średnicy) mają większy, negatywny wpływ na zdrowie człowieka niż ich masa. W efekcie tego liczba cząstek stałych została objęta limitem w nowych przepisach Euro 5+ dotyczących silników ZS. Przepisy te znacznie różnią się od poprzednich metodyką pomiarową wyznaczania emisji związków gazowych i cząstek stałych.

Kondensacyjne liczniki cząstek stałych (CPCs – *Condensation Particle Counters*) od pewnego czasu są szeroko stosowane do pomiarów w czasie rzeczywistym całkowitej lub średniej liczby cząstek stałych emitowanych z różnych źródeł. Wychodząc naprzeciw przyszłym wymaganiom, wielu producentów aparatury do badań emisji związków szkodliwych spalin wprowadza obecnie na rynek aparatury pomiarowej systemy do pomiaru liczby cząstek stałych (zgodne z wymaganiami PMP), przeznaczone do badań samochodów kategorii M1 i N1 (pojazdów typu LDV), zgodne z wymaganiami przepisów zawartymi w [1] i [2]. W związku z wprowadzonymi limitami w regulacjach prawnych, systemy do wyznaczania liczby cząstek stałych w spalinach są obecnie podstawowym wyposażeniem laboratoriów badania emisji w celu oceny sprawności urządzeń oczyszczających spaliny z cząstek stałych (filtry cząstek stałych – DPF) w czasie prowadzonych prac badawczo-rozwojowych, ponieważ pomiar tylko masy cząstek stałych jest już obecnie niewystarczający [3, 4]. Ponadto limity masy i liczby cząstek stałych nie są równoważne. Limit liczby cząstek jest bardziej restrykcyjny, co powoduje, że pomiar ten jest bardziej reprezentatywnym badaniem w przypadku silników ZS i ich układów oczyszczania spalin [3].

Ponieważ nie są publikowane informacje na temat korelacji wyników pomiarów uzyskanych z różnych urządzeń do pomiaru liczby cząstek stałych, zaproponowano badania pomiaru wartości PN, których celem było wyznaczenie korelacji między wynikami uzyskanymi z dwóch różnych systemów pomiarowych pochodzących od dwu różnych producentów, przy pomiarach wykonywanych równolegle.

Pojazd, dla którego emisja PN spełnia wymagania przepisów Euro 5+, gdzie dopuszczalny limit liczby cząstek stałych wynosi 6×10^{11} km⁻¹, który wyemituje około $6,6 \times 10^{12}$ cząstek stałych w całym teście NEDC, będzie średnio emitował kilkaset milionów cząstek stałych na każdy metr testu jezdneho. W związku z tym emisja PM wyrażana przez liczbę cząstek stałych jest najlepiej wyrażana przez funkcją potęgową, z nie więcej niż dwoma miejscami dziesiętnymi, ponieważ uzyskiwane wartości wyników w czasie takich pomiarów są wielokrotnie większe od innych parametrów typowo określanych przy badaniach emisji związków szkodliwych spalin.

2. Opis dwu systemów do pomiaru liczby cząstek poddanych badaniom porównawczym

Zgodnie z przedstawionym celem niniejszego opracowania, którym jest porównanie działania dwóch podobnych systemów do pomiaru liczby cząstek stałych, pochodzących od różnych producentów, szczególną uwagę zwrócono na sposób działania obu urządzeń. Podstawowe, wybrane

Table 1. Key properties of the particle counting systems tested

Tabela 1. Podstawowe parametry porównywanych systemów do pomiaru liczby cząstek stałych

Parameter/parametr	System/system pomiarowy 1	System/system pomiarowy 2
Manufacturer/producent	AVL	HORIBA
Model	Particle Counter Advanced 489	MEXASPCS-2000
Year of manufacture/rok produkcji	2008	2010
Legislative basis/zgodność z wymogami	PMP-compliant/zgodny; UN-ECE Reg. 83, Annex 4a, Appendix 5	PMP-compliant/zgodny; UN-ECE Reg. 83, Annex 4a, Appendix 5
Particle classifier	Performed by coniform sample probe	Performed by coniform sample probe
PTS temperature	150 °C	47 °C
VPR temperature	Adjustable/regulowana; 350 °C setting used/ podczas badań	350 °C
CPC	TSI 3790	TSI 3790
Measurement range (to comply with legislation)/zakres pomiarowy	0-10 000 #/cm ³	0-10 000 #/cm ³
Working fluid/czynnik roboczy	n-butanol	n-butanol
Control software	Manufacturer's own/producenta	Manufacturer's own/producenta

Sources: [5] and [6], systems 1 & 2 and their control software

correct for the statistical probability of multiple particles impeding the laser beam at the same time (Fig. 1). Within certain limits, the application of coincidence correction increases the accuracy of the particle count, and for this reason it is required in the legislation [2]. The theoretical error inherent in the number counting process decreases logarithmically with particle concentration [7] (Fig. 1); at concentrations above a few hundred #/cm³ the theoretical error becomes very low.

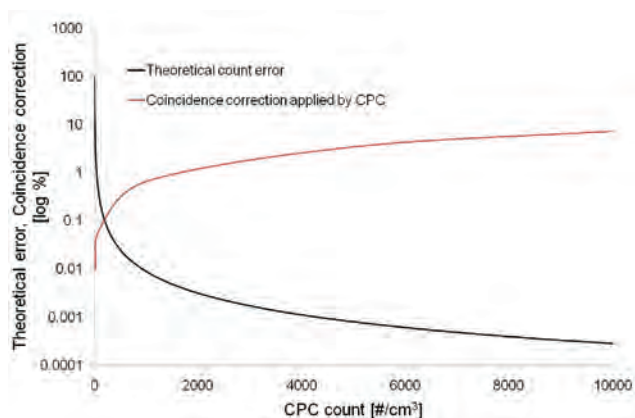


Fig. 1. Theoretical count error (after [7]) and CPC coincidence correction [8] for CPC particle counts 0-10 000 #/cm³

Rys. 1. Teoretyczny błąd pomiaru liczby cząstek stałych i korekta wykorzystywana w licznikach

The legislation allows for multiple system layouts and design concepts, provided certain criteria are met. A schematic of the recommended system layout is presented in Figure 2.

The key system components are: the particle transfer system (PTS), Particle Number Diluters 1 & 2 (PND1 & PND2), the volatile particle reducer or evaporation tube (VPR, ET) and the condensation particle counter unit (CPC).

parametry dwóch systemów użytych podczas badań przedstawiono w tabeli 1.

Zasada działania tych dwóch urządzeń do określania liczby cząstek stałych w spalinach jest taka sama. Próbka w czasie pomiaru była pobierana z tunelu rozcieńczającego spaliny powietrzem, który używa się również do pomiaru masy PM, była podgrzewana i rozcieńczana. Podgrzewanie próbki miało na celu odparowanie lotnych składników cząstek stałych; następnie próbka była rozcieńczana i schłodzona, a potem była kierowana do jednostki kondensacyjnej CPC. W skraplaczu do próbki dodawana jest niewielka ilość butanolu, który skrapla się na cząstkach, powodując zwiększenie ich średnicy i poprawę możliwości ich detekcji. Dokładnie określona objętość tak przygotowanej próbki jest przepuszczana przez wiązkę promieniowania laserowego. Przerwy w promieniowaniu wiązki lasera są wykrywane za pomocą soczewek i fotometru, który generuje sygnał informujący o wykryciu cząstki. Oba systemy wykorzystują matematyczne zależności określające statystyczne prawdopodobieństwo przejścia kilku cząstek przez wiązkę laserową w tym samym czasie (rys. 1). Wykorzystanie tych zależności powoduje zwiększenie dokładności wyznaczenia liczby cząstek stałych, dlatego w wymaganiach pomiarowych określonych w przepisach są podane granice wykorzystania tych zależności [2]. Błąd teoretyczny towarzyszący wyznaczaniu liczby cząstek stałych zmniejsza się logarytmicznie ze zwiększaniem koncentracji tych cząstek [7] (rys. 1); dla koncentracji powyżej kilkuset sztuk na centymetr sześcienny błąd teoretyczny jest już bardzo mały.

Wymagania przepisów dotyczących tego pomiaru umożliwiają wykorzystanie kilku koncepcji układów pomiarowych, pod warunkiem zachowania określonych wymagań. Schemat działania rekomendowanego urządzenia pomiarowego przedstawiono na rys. 2. Kluczowe komponenty układu są następujące: system przepływu cząstek (PTS – *Particulate Transfer System*), tunele rozcieńczające 1 i 2 (PND – *Particulate Number Diluters*), reduktor cząstek

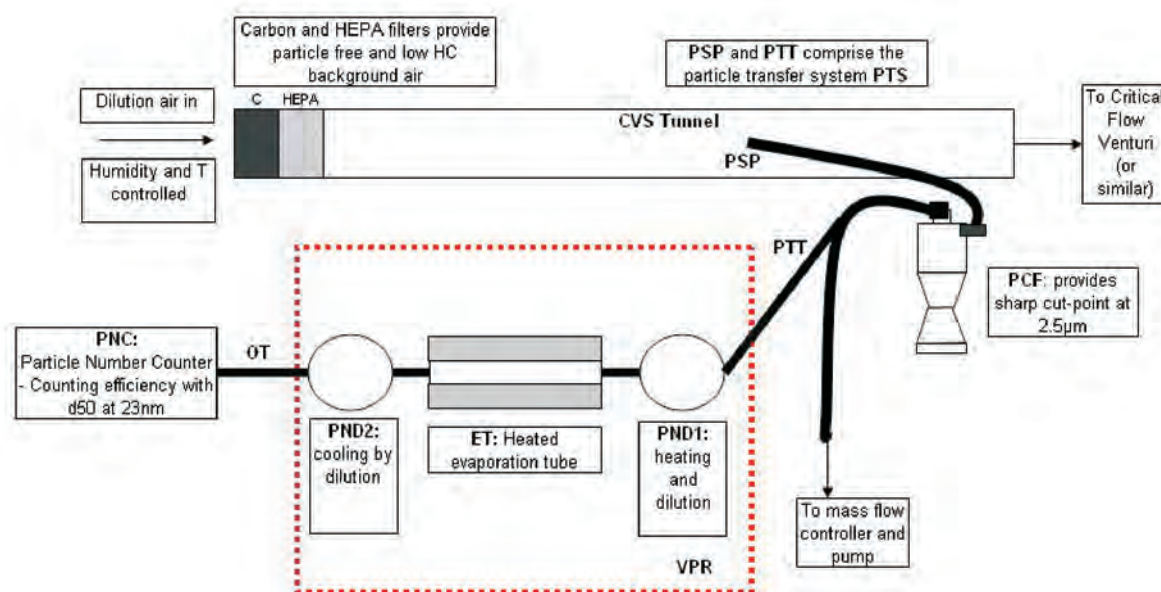


Fig. 2. Recommended system layout for quantification of solid particles [2]

Rys. 2. Schemat rekomendowanego systemu do pomiaru liczby cząstek stałych

The main difference between the two systems used in this study lies in the sample handling approach. System 1 features its PND1 immediately downstream of the sampling probe, mere centimeters from the CVS tunnel. Here the sample is mixed with dilution air at a temperature of 150 °C, and the diluted sample is then conveyed onwards to the ET. In contrast, System 2 does not feature its PND1 diluter in the sample line. The sample is conveyed through a heated sample line (at 47 °C) to the instrument cabinet, where it passes through a heated orifice block, enters PND1 and then moves onwards to the VPR. Additionally, there are some differences between the two systems regarding the means by which the quantity of supplied dilution air is measured and controlled.

3. Experimental programme

A series of emissions tests were performed using two particle number counting systems in parallel, to obtain results suitable for direct comparison. Measuring with both systems simultaneously effectively eliminates the driver and the vehicle as sources of error, since any variation (e.g. vehicle oil temperature, fuel density, driver errors) will affect both systems. Since the context of the investigation was the quantification of PN emissions of light-duty vehicles for conformity with the Euro 5+ PN limit, DPF-equipped Euro 5 vehicles were used as a source of particulates. Three vehicles were used, two of which were tested with multiple aftertreatment systems, giving a total of 14 vehicle-ATS combinations. No dilution settings are specified in the legislation, however the dilution ratio must be sufficient to ensure that the maximum value read by the CPC is $\leq 10\,000 \text{ \#/cm}^3$ [2]. Any tests where the raw particle count exceeded this value were rejected and repeated using a higher dilution setting. Since the dilution settings of each instrument are discretely

lotnych lub tunel odparowujący (VPR – *Volatile Particle Reducer*, ET – *Evaporation Tube*), kondensacyjny licznik cząstek (CPC – *Condensation Particle Counter*).

Zasadnicza różnica między dwoma testowanymi urządzeniami polega na różnych systemach pobierania próbki do pomiaru. W systemie 1 tunel rozcieńczający (PND1) znajduje się bezpośrednio za miejscem poboru próbki, zaledwie kilka centymetrów od tunelu rozcieńczającego układu CVS. Spaliny są w nim mieszane z powietrzem w temperaturze 150 °C i dalej są przekazywane do tunelu odparowującego (ET). W drugim przypadku systemu tunel rozcieńczający PND1 nie znajduje się na drodze poboru spalin. Pobrana próbka spalin płynie przez podgrzewany przewód próbkujący (47 °C) do obudowy urządzenia, przechodzi dalej przez podgrzewaną zwężkę do tunelu rozcieńczającego PND1, a następnie do tunelu odparowania lotnych składników VPR. Występują jeszcze inne różnice pomiędzy tymi dwoma urządzeniami, które dotyczą sposobu określania pobieranego powietrza do rozcieńczania spalin i sterowania tym rozcieńczeniem.

3. Program badań

W ramach badań porównawczych wykonanych z użyciem dwóch systemów do pomiaru liczby cząstek stałych przeprowadzono serię testów emisji na hamowni podwozowej w cyklach jezdnych NEDC. Urządzenia te były połączone równolegle, aby można było porównać uzyskane wyniki badań i wyeliminować wpływ takich źródeł błędów pomiaru, jak sposób jazdy kierowcy, zachowanie samochodu i praca silnika, temperatura oleju, gęstość paliwa itp., ponieważ celem prowadzenia pomiarów PN jest określenie poziomu tej emisji dla pojazdów spełniających wymagania Euro 5+. Do wykonywania testów emisji użyto pojazdów kategorii LDV, spełniających normę Euro 5 i wyposażonych w filtry

(rather than continuously) adjustable, and since the dilution setting of System 1 is fixed at 10 and System 2 at 15, it is not possible to use the same dilution settings for both instruments. Within these constraints, the dilution settings of each instrument were selected to give dilution settings as close as possible (e.g. System 1 = 100, System 2 = 150; System 1 = 1000, System 2 = 750 etc.). An earlier study concluded that the dilution setting used had no significant effect on the particle count results, within certain limits [9].

Key characteristics of the three test vehicles are given in Table 2.

cząstek stałych (DPF). Badania wykonano na trzech pojazdach, z których dwa były badane w różnych konfiguracjach, zależnie od zastosowanych układów oczyszczania spalin (zmienianych do kolejnych testów). W rezultacie dało to 14 różnych kombinacji samochod + układ DPF w czasie badań. Ponieważ w regulacjach prawnych nie ma wytycznych odnośnie do rozcieńczania spalin, współczynnik rozcieńczenia dobrano tak, aby maksymalna koncentracja cząstek stałych zmierzona przez CPC nie była większa niż $10\,000\text{ cm}^{-3}$ [2]. Odrzucono wyniki testów, a następnie powtórzono wszystkie testy, w których ta wartość koncentracji była przekroczona.

Table 2. Test vehicles

Tabela 2. Charakterystyki techniczne badanych pojazdów

Parameter/parametr	Vehicle/pojazd 1	Vehicle/pojazd 2	Vehicle/pojazd 3
Vehicle type/rodzaj pojazdu	Passenger car/ samochód osobowy	Passenger car/ samochód osobowy	Passenger car/ samochód osobowy
Approx. displacement/objętość skokowa silnika [dm ³]	1.3	1.6	2.0
Emissions standard/poziom emisji, aftertreatment/układ oczyszczania spalin	Euro 5, close-coupled/ zintegrowany reaktor DOC+DPF	Euro 5, close-coupled/ zintegrowany reaktor DOC+DPF	Euro 5, close-coupled/ zintegrowany reaktor DOC+DPF
Number of aftertreatment systems tested/liczba przebadanych układów oczyszczania spalin	1	8	5

All vehicles were tested on a chassis dynamometer in BOSMAL's climate controlled laboratory (Fig. 3) (described in detail in [10]) over the well-known NEDC. Two particle counting systems were connected to the same dilution tunnel to be tested in parallel (Figs. 4, 5). Using the NEDC cycle and Type I test procedure provided a wide range of conditions for comparison of particle counts: cold start, warm-up during urban driving and finally high-speed highway conditions. Engine speed/load, and in-cylinder temperature affect

Nie było możliwe wykonanie badań dla takich samych ustawień rozcieńczenia dla obu systemów pomiarowych ze względu na różny sposób regulacji tego rozcieńczenia dla przyrządów 1 i 2. Ustawienia tego rozcieńczenia starano się dobrać tak, jak to było możliwe (np. System 1 = 100, System 2 = 150 oraz System 1 = 1000, System 2 = 750 itd.). Wcześniejsze doświadczenia wskazują jednak, że ustawienia te nie mają znaczącego wpływu na wyniki pomiarów, przy określonych limitach [9]. Zestawienie badanych pojazdów zamieszczono w tabeli 2.



Fig. 3. BOSMAL's climate-controlled emissions testing laboratory, showing a vehicle mounted on the chassis dynamometer and the windspeed fan

Rys. 3. Laboratorium badania emisji z samochodem zamontowanym na hamowni podwoziowej i z widocznym wentylatorem w komorze klimatycznej Instytutu BOSMAL

Wszystkie badania wykonano podczas testu jezdnego NEDC, na hamowni podwoziowej w klimatyzowanej komorze laboratorium badania emisji Instytutu BOSMAL (rys. 3) (laboratorium opisano szczegółowo w pracy [10]). Oba systemy do pomiaru liczby cząstek stałych podłączone były bezpośrednio do tego samego tunelu rozcieńczającego (rys. 4 i 5) i pomiary prowadzono równolegle na obu urządzeniach. Cykl jezdny NEDC wykonywany według procedury typu 1 umożliwił uzyskanie wyników badań dla różnych warunków pracy silnika: zimny rozruch, nagrzewanie silnika w czasie jazdy miejskiej oraz jazda samochodem z dużymi prędkościami w czasie pozamiejskiej fazy testu. Prędkość obrotowa, obciążenie silnika oraz parametry przebiegu procesu spalania w cylindrze silnika, np. temperatura, mają istotny wpływ na emisję cząstek stałych, dlatego prowadzone badania mogły być adekwatne dla różnej emisji PN przy różnych stanach pracy silnika. Pomimo że głównym celem badań



Fig. 4. Dilution tunnel downstream view, showing System 1 connected to the dilution tunnel

Rys. 4. Tunel rozcieńczający i system pomiarowy nr 1 podłączony do tego tunelu

the properties of the particulates produced by the engine, and thus the tests performed permit evaluation of the two systems' quantification of a range of particulates. While the focus of the experiments was particle number emissions, modal emissions data were also measured and recorded, as was the PM mass. These 'traditional' emissions parameters were used as criteria to ensure repeatability between tests. Two to three tests were performed on each vehicle-ATS combination, using both particle counting systems.

4. Results & Discussion

Small differences were observed between the two particle counting systems. Second-by-second traces and mean values obtained over the UDC, EUDC and NEDC all showed differences. The figures below show various comparisons between the results obtained using the two systems. Since the zero



Fig. 5. Dilution tunnel upstream view, showing System 2 connected to the dilution tunnel

Rys. 5. Tunelu rozcieńczający i system pomiarowy nr 2 podłączony do tego tunelu

był pomiar liczby cząstek, wykonano także pomiary emisji związków gazowych oraz masy cząstek stałych PM. Emisja związków gazowych oraz masy cząstek stałych posłużyły jako kryterium oceny powtarzalności testów. Dla każdego obiektu badawczego (samochód + filtr cząstek stałych DPF) wykonano dwa lub trzy testy emisji, w czasie których mierzono liczbę cząstek PN przy użyciu obu porównywanych systemów pomiarowych.

4. Wyniki badań i ich analiza

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów stwierdzono, że wartości PN różnią się nieznacznie przy pomiarze wykonanym na obu urządzeniach pomiarowych. Różnice te są widoczne, gdy analizuje się wartości koncentracji PN w każdej sekundzie oraz średnie wartości dla całych cykli UDC, EUDC i NEDC. Przykładowe wyniki pomiaru koncentracji cząstek stałych dla obu systemów pomiarowych przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8. Ponieważ ustawienie „0”, które jest niezbędne do codziennej kalibracji obu systemów,

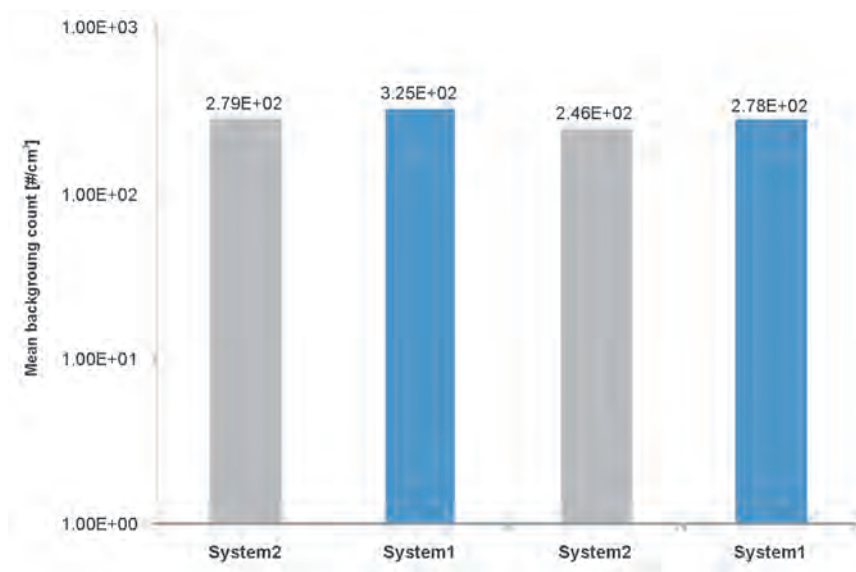


Fig. 6. Comparison of background readings for the two systems (each pair of readings taken a week apart during similar weather conditions with the same dilution settings)

Rys. 6. Porównanie zmierzonego tła pomiarowego dla obu systemów

values (as given by the daily calibration procedures of the two systems) were very similar, the trendlines which appear in the figures below have been forced through the origin (i.e. $y = mx + 0$).

The background readings of both instruments (taken with all particle number measurement systems active, but before cranking the engine) showed reasonable agreement, but with a tendency for System 1 to report higher values (Fig. 6).

Subjectively, on screen particle count traces appeared similar during testing (Fig. 7).

Particle number emissions were calculated using the same equation for both systems, as specified in the legislation [2]. Since the systems were connected to the same CVS, all variables in the calculation were identical, apart from each system's corrected particle count. An example of particle number emissions results from systems 1 & 2 is shown in Figure 8 and Table 3. These particular tests showed a good agreement, with limited differences in the results, but results from System 1 were higher in all cases. These differences between the two systems are relatively close to the differences reported in [3], but other results showed somewhat greater differences.

The cumulative particle count traces of both systems revealed similar trends but with a steadily increasing offset, as shown in Figure 9.

An example of the evolution of the ratio of the cumulative counts of both systems is shown in Figure 10. The first ~60

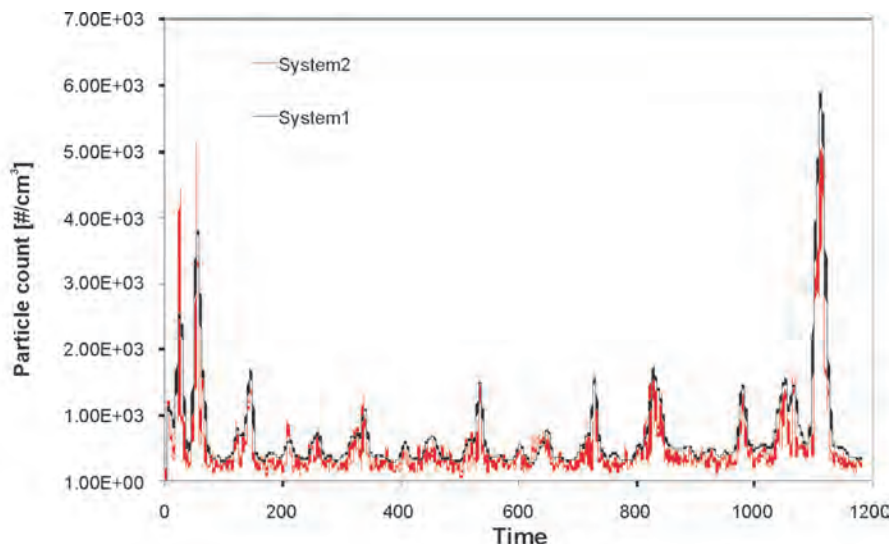


Fig. 7. Second-by-second corrected particle count results from both systems over the NEDC

Rys. 7. Przebieg zmian koncentracji cząstek stałych w czasie cyklu NEDC

było bardzo zbliżone, linie trendu odnoszące się do poniższych wykresów były określone jako $y = mx + 0$.

Odczytane tło pomiarowe dla obu urządzeń (pomiar koncentracji cząstek stałych wykonano dla unieruchomionego silnika, przed początkiem jego rozruchu) różniło się nieznacznie, większe wartości odczytano dla systemu 1 (rys. 6).

Przebieg zmian koncentracji cząstek stałych podczas testu jezdnego jest bardzo podobny dla obu użytych systemów pomiarowych (rys. 7).

Koncentracja cząstek stałych dla obu systemów była wyznaczona przy użyciu tych samych zależności opisanych w wymaganiach technicznych odnośnych przepisów [2]. Ponieważ oba systemy pomiarowe były podłączone do tego samego układu CVS, wszystkie zmienne potrzebne do obliczeń były takie same dla obu systemów, oprócz funkcji korygującej liczbę cząstek. Przykłady wyników pomiarów przedstawiono na rysunku 8 i w tabeli 3. Wyniki zamieszczone na rysunku 8 charakteryzują się małymi rozbieżnościami, jednak zauważono, że wartości dla systemu 1 są większe we wszystkich przypadkach. Różnice te są podobne do opisanych w pracy [3], natomiast pozostałe wyniki pomiarów różnią się już bardziej.

Skumulowany przebieg zmian koncentracji cząstek stałych dla obu systemów wykazuje podobną tendencję (rys. 9).

Przykład zmian wyznaczonego współczynnika (ilorazu) skumulowanej koncentracji liczby cząstek stałych ($\sum_{\text{system2}} / \sum_{\text{system1}}$) przedstawiono na rysunku 10. W początkowych 60 sekundach testu zaobserwowano nieregularne zmiany tego współczynnika. Po około 180 sekundach testu wartości tego współczynnika stabilizują się i są dla trzech testów

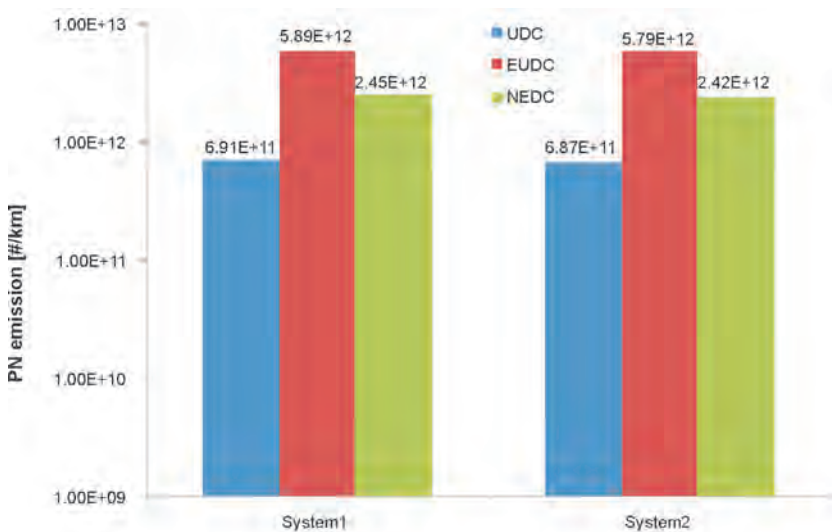


Fig. 8. PN emission factors, calculated according to [2], using mean particle count values from three tests performed on the same vehicle/ATS

Rys. 8. Wartości liczby cząstek stałych wyznaczone zgodnie z [2]; wartości średnie wyznaczono dla trzech testów, dla tego samego pojazdu

Table 3. PN emission factors, calculated according to [2], using mean particle count values from three tests performed on the same vehicle/ATS
 Tabela 3. Wartości liczby cząstek stałych wyznaczone zgodnie z [2]; wartości średnie wyznaczone dla trzech testów, dla tego samego pojazdu

Cycle/cykl jezdny	Mean System 1 emission factor [#km]/ średnia emisja PN na 1 km dla Systemu 1 (n = 3)	Mean System 2 emission factor [#km]/średnia emisja PN na 1 km dla Systemu 2 (n = 3)	Difference/różnica [%]
UDC	6.91E11	6.87E11	0.65
EUDC	5.89E12	5.79E12	1.82
NEDC	2.45E12	2.42E12	1.60

seconds of each test were characterised by chaotic fluctuations in the cumulative count ratio between the two systems. By around 180 seconds into the cycle, the ratio had stabilized and was thereafter similar for these three tests, with a mean ratio of 0.89 (i.e. an 11% difference) maintained for the remainder of the NEDC.

Particle count data from the first (UDC) and second (EUDC) phases, as well as the entire NEDC were compared. Each of these results (3 per test per system) were compared (Fig. 11). While most results lie close to the line $y = x$, a difference in the two datasets is visible.

Based on the particle counts obtained over the UDC, EUDC and NEDC from the two systems, a mean discrepancy of 9.3% was observed (System 1 > System 2). The observed difference in the number counts between the two systems was relatively consistent, with 65% of tests performed showing a difference of 0–20% (System 1 > System 2). In a few instances, the reverse was observed (System 1 < System 2), but this only occurred in around 15% of all tests performed. A brief review of studies comparing PMP-compliant particle counting systems [7] report differences of $\pm 27\%$ and $\pm 20\%$; the experimental results in [7] reveal a difference between two systems of $\pm 15\%$. Given that identical systems from the same manufacturer show small differences in their results [11], it is to be expected that systems of different ages, designs and manufacturers exhibit some discrepancies in their results [7]. Even when using a single particle counter, the total repeatability from test to test has been calculated to be $\pm 8\%$ [11]. Further investigations in

bardzo zbliżone; ich średnia wartość wynosi 0,89 (około 11% różnicy) i jest taka sama także dla pozostałych wykonanych testów NEDC.

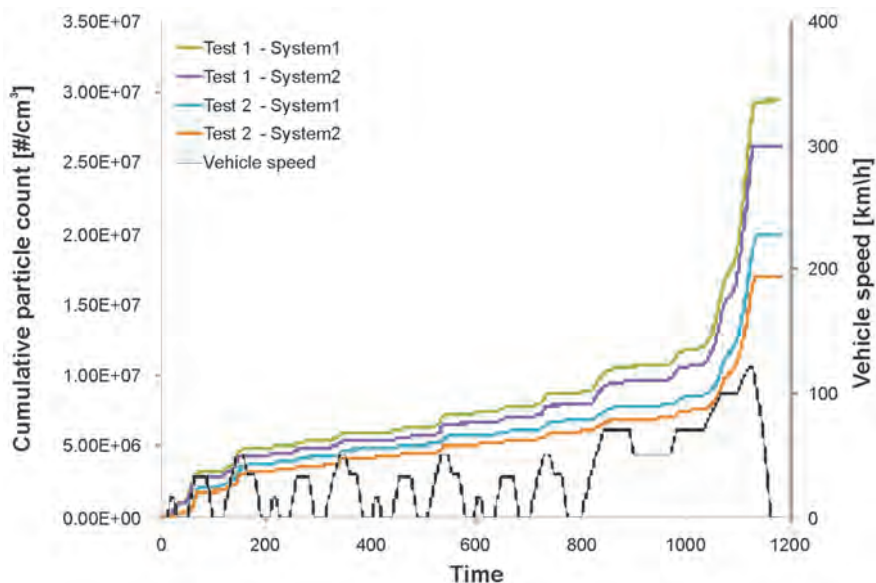


Fig. 9. Cumulative particle counts obtained during two tests on the same vehicle/ATS over the NEDC
 Rys. 9. Skumulowany przebieg zmian liczby cząstek stałych w teście NEDC dla dwóch pojazdów (po dwa testy dla każdego pojazdu)

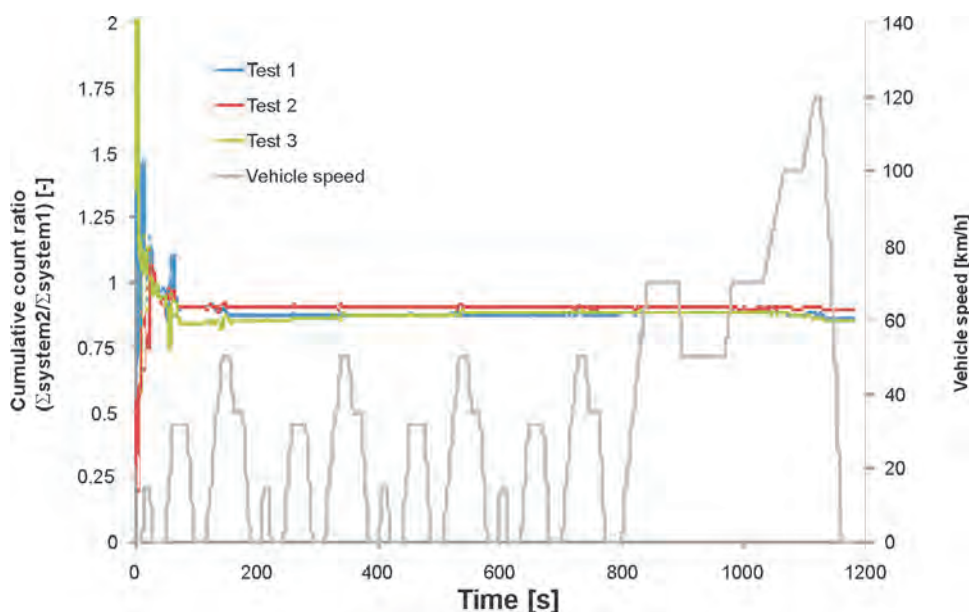


Fig. 10. A comparison of the ratio of the cumulative count of both systems for 3 tests performed on the same vehicle/ATS over the NEDC

Rys. 10. Porównanie współczynników skumulowanej koncentracji

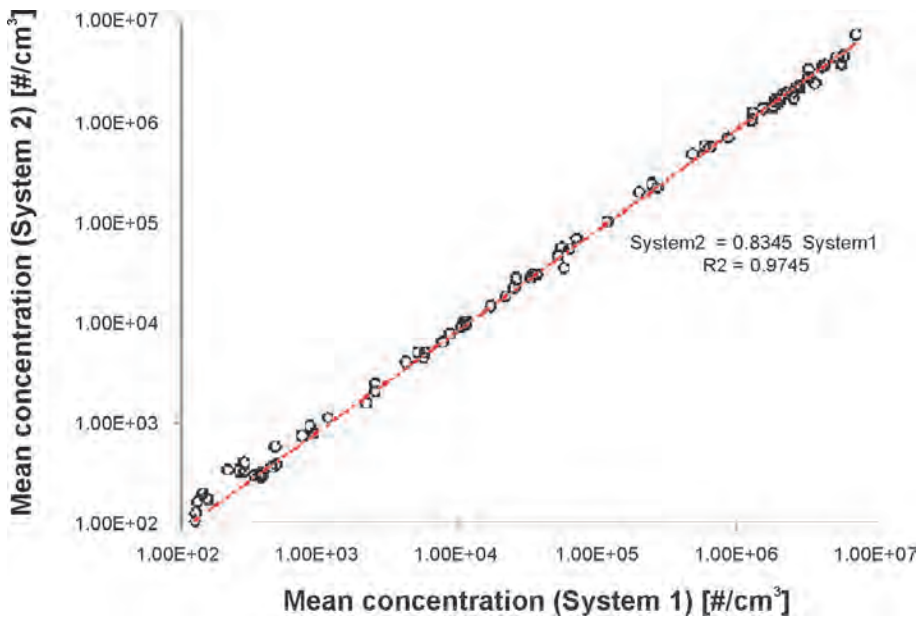


Fig. 11. A comparison of all collected data (UDC, EUDC, NEDC) from Systems 1 and 2 for all three tests vehicles and various ATS

Rys. 11. Porównanie wyników badań (dla testów UDC, EUDC, NEDC) dla obu systemów 1 i 2 dla trzech badanych samochodów

this area would require testing two devices of the same type simultaneously for comparison of results – i.e. System 1 vs. System 1, System 2 vs. System 2. The results of such a test would be suitable for direct comparison to the discrepancies observed in the experimental work described here.

The difference in the particle counts between the two systems was not observed to correlate with any environmental parameter (ambient temperature, humidity, etc). The emission level (as determined by the vehicle in question and the

możliwe różnice $\pm 27\%$ i $\pm 20\%$, natomiast z wykonanych badań porównawczych dwóch systemów wynika, że różnica wynosiła $\pm 15\%$ [7]. Badania wykazały nieznaczne różnice między dwoma takimi samymi systemami tego samego producenta [11], jednak przy dwu systemach różniących się producentem, rokiem budowy i czasem użytkowania różnice w wynikach mogą być większe [7]. Nawet w czasie używania tylko jednego systemu pomiarowego PN powtarzalność

Porównano wyniki pomiarów dla obu faz testu UDC, EUDC oraz całego cyklu jezdny NEDC. Stwierdzono, że między wynikami zachodzi duża korelacja i leżą one wzdłuż prostej funkcji opisanej równaniem $y = f(x)$ (rys. 11).

Bazując na wynikach uzyskanych w testach UDC, EUDC i NEDC dla dwóch systemów pomiarowych, odnotowano średnią rozbieżność na poziomie 9,3% (system 1 > system 2). Dla 65% wykonanych testów różnice mieszczą się w przedziale 0 – 20% (system 1 > system 2). Tylko w nielicznych przypadkach, około 15% wykonanych testów, zaobserwowano odwrotną tendencję (tzn. system 2 > system 1).

Krótką teoretyczną analizą porównawczą systemów pomiaru liczby cząstek stałych, zgodnych z wymaganiami PMP, zaprezentowana w pracy [7] wskazuje na możliwe różnice $\pm 27\%$ i $\pm 20\%$, natomiast z wykonanych badań porównawczych dwóch systemów wynika, że różnica wynosiła $\pm 15\%$ [7]. Badania wykazały nieznaczne różnice między dwoma takimi samymi systemami tego samego producenta [11], jednak przy dwu systemach różniących się producentem, rokiem budowy i czasem użytkowania różnice w wynikach mogą być większe [7]. Nawet w czasie używania tylko jednego systemu pomiarowego PN powtarzalność wyników wynosi około $\pm 8\%$ [11]. Dalsze badania w tym zakresie wymagałyby przeprowadzenia badań porównawczych dwóch urządzeń tego samego typu. Wyniki tak przeprowadzonych badań porównawczych mogłyby posłużyć do bezpośredniego oszacowania zaobserwowanych różnic pomiarów i analizy wyników opisanych w tej pracy.

Podczas wykonywanych badań nie zaobserwowano wpływu warunków otoczenia na uzyskane wyniki (temperatury otoczenia, wilgotności itp.), natomiast zaobserwowano zależność między średnią koncentracją cząstek stałych (w zależności od stopnia sprawności filtra cząstek DPF) a wskazaniemi

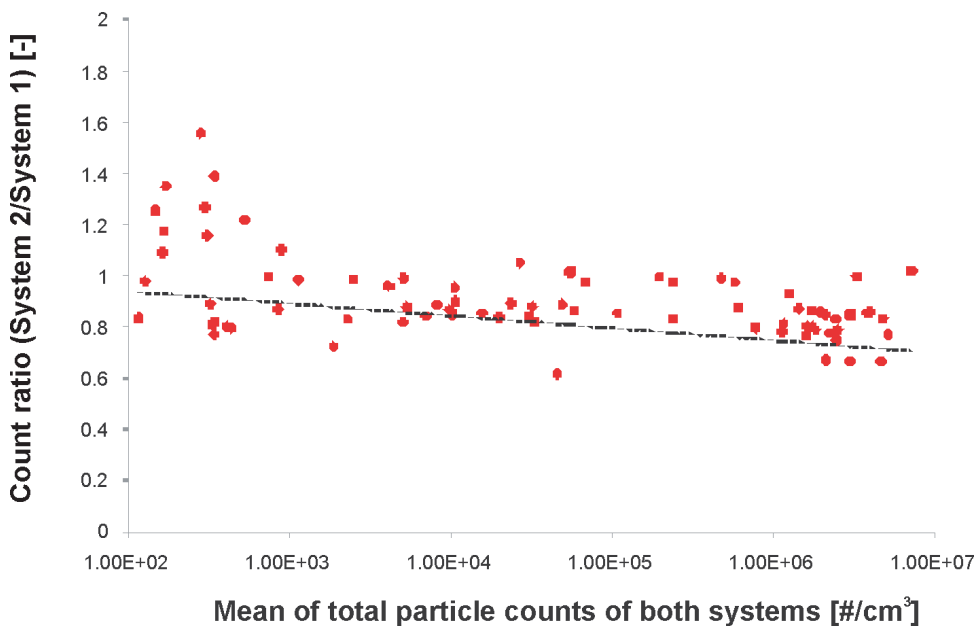


Fig. 12. Correlation between mean particle count obtained over the UDC, EUDC and NEDC and the difference in the two system's results

Rys. 12. Korelacja między średnią liczbą cząstek stałych w testach UDC, EUDC i NEDC i różnicą w wynikach dla obu systemów

efficiency of the DPF fitted) was observed to correlate somewhat with the observed difference between the two systems' results (Figure 12). The mean of the two values returned by the systems can be used as a proxy for the 'real' value. The correlation shown in Fig. 12 indicates a gradual increase in discrepancy with increasing emissions, which is mathematically logical. This also suggests that any particle losses in System2 were more severe at higher concentrations.

Following the observation of modest but consistent differences in the particle counts of the two systems, questions arise as to the origin of these discrepancies. A range of possible causes are considered and discussed below.

The close proximity and identical geometry of the sampling probes, and the high turbulence within the dilution tunnel can be assumed to negate any differences in the sample drawn into the systems' respective sampling probes. The quantification of volatile particles is particularly difficult, and substantial surface effects can occur in sampling systems [9]. Partially for this reason, the PN test procedure specified in the legislation deliberately excludes volatile particles, and both systems tested here featured a volatile particle remover operating at the same temperature setting (350 °C), designed to ensure > 99.0% removal of 30 nm tetracontane particles, as required by the legislation [2]. The temperatures of both systems' VPRs were checked before commencing a test, and were monitored during the test; no significant fluctuations were observed. Thus, the contribution of any volatile particles to the total particle count is likely to have been very limited for both systems. However, the possibility that System1's VPR temperature sensor had suffered a small drift cannot be excluded. This could cause the VPR to operate at a slightly lower temperature, thereby allowing quantification of some volatile particles and increasing the total number count somewhat. The survival of volatile particles in the VPR has been calculated to cause limited discrepancies in the total particle count ($\leq 1.6\%$) [11], significantly smaller than the differences observed.

Following the rejection of these parameters as likely causes of the observed difference, the overall observation of slightly lower particle numbers in System 2 can perhaps be at least partially attributed to the aforementioned differences in the sample intake and dilution stages. One of the root causes of the difficulty of accurately quantifying PN is the fact that particles can be deposited not on the surfaces of sample transfer tubing, but also on the surfaces of other particles. It is a possibility that the relatively concentrated, lower temperature sample in System 2 suffered slightly greater particle losses while travelling to System 2's PND1, thereby reducing the number count somewhat. The transfer of an undiluted sample (containing particles with a shorter mean free path than those in a diluted sample) in System 2 gives an (admittedly brief) opportunity for agglomeration of particles, which would later reduce the number count somewhat. The difference in the temperature at which the two samples are conveyed through the sample tubing could have an impact on particle deposition processes through

obu systemów pomiarowych. Średnią wartość uzyskaną z dwóch systemów przyjęto jako rzeczywistą koncentrację. Z zależności przedstawionej na rysunku 12 wynika, że ze zwiększaniem koncentracji cząstek stałych zwiększa się różnica między wskazaniami obu systemów. To oznacza również, że dla większej koncentracji cząstek stałych w spalinach dla systemu 2 odnotowano większe niedokładności pomiaru.

Wobec niezbyt dużej, ale systematycznie występującej różnicy wskazań dwóch systemów pojawia się pytanie o źródło tych różnic pomiarów. Poniżej przedstawiono krótką dyskusję na temat możliwych przyczyn tego zjawiska.

Ze względu na podobieństwo geometryczne sond pomiarowych i duże zawirowanie podczas przepływów turbulentnych można przyjąć, że nie ma różnic w przygotowaniu próbek spalin do pomiarów. Ze względu na możliwość wystąpienia w układzie poboru próbki efektu oddziaływania powierzchni ścianek, ilościowe określenie cząstek lotnych jest szczególnie trudne [9]. Jest to jeden z powodów, dla którego procedury pomiaru liczby cząstek stałych zawarte w przepisach wykluczają z pomiaru cząstki lotne. W obu systemach były reduktory cząstek lotnych i pracowały w tych samych temperaturach (350 °C). Są one zaprojektowane tak, aby usunąć ponad 99% cząstek o średnicach 30 nm; wymóg ten jest zapisany w regulacjach prawnych [2]. Temperatury pracy reduktorów cząstek lotnych (VPR) były sprawdzane przed rozpoczęciem pomiarów i monitorowane w ich trakcie – nie zaobserwowano znaczących odchyżeń od założonych wartości. Z tego powodu udział cząstek lotnych w układzie pomiarowym dla obu systemów był bardzo mały. Jednak nie można wykluczyć nieznaczącej zmiany sygnału pomiarowego czujnika temperatury układu redukcji lotnych cząstek systemu 1, co mogło spowodować niższą temperaturę pracy tego układu i w konsekwencji większą liczbę lotnych cząstek. Pozostanie cząstek lotnych w układzie VPR zostało obliczone w stosunku do całkowitej liczby cząstek (poniżej 1,6%) [11]; wartość ta jest niższa od różnicy pomiarów obu systemów pomiarowych.

Mniejsze wskazania liczby cząstek stałych dla systemu 2 mogły być spowodowane wspomnianymi wyżej różnicami w przygotowaniu próbek spalin i rozcieńczeniu. Inną przyczyną mogły też być osadzanie cząstek nie na ściankach drogi pomiarowej, ale na powierzchniach innych cząstek. Jest możliwe, że z powodu niższej temperatury w systemie 2 mniejsza liczba przetransportowanych cząstek trafiała do pierwszego stopnia rozcieńczenia. Przepływ nierozcieńczonej próbki w systemie 2 umożliwił aglomerację cząstek stałych i w związku z tym zmniejszenie ich liczby. Różnica temperatur, w jakich próbki były transportowane w układzie pomiarowym mogła mieć wpływ na osadzanie, co mogło być spowodowane efektem polegającym na „odpychaniu” cząstek od ścianek przewodu, które miały wyższą temperaturę od przepływającego czynnika (spalin). Efekt ten mógł także wystąpić w liczniku, ponieważ średnica cząstek jest odwrotnie proporcjonalna do prędkości ruchu wynikającego z różnicy temperatury [13]. Występowanie przyrostu temperatury mogło wpływać również na próbkowanie [11]. Różnica temperatury między próbką spalin a ściankami

thermophoretic effects, since particles are repelled from boundary walls which are at a higher temperature than the fluid in which they are carried [12]. Moreover, where this effect occurs, it can also act as a size classifier, as particle diameter is inversely proportional to thermophoretic velocity [13]. The existence of any type of temperature gradient can affect the sample through these thermophoretic effects [11]. The difference in the temperature of the sample taken from the dilution tunnel and the sample tubing is around 115 °C in the case of System 1 and around 12 °C in the case of System 2. These differences could be a plausible explanation for the particle count differences of the magnitude observed. The small but relatively consistent discrepancy reported here is worthy of further investigation. Performing a size classification of the particulates present in the exhaust would provide further information on likely particle deposition/sample loss mechanisms. Additionally, the particles present in each system's output (sample return route) could be investigated, to further investigate particle losses within the two systems. Furthermore, the existence of long-term trends in the results produced by System 2 will be assessed as this system accrues operating hours. In order to fully determine particle losses and the responsiveness of the two systems, a steady particle source could be used to provide particles of known diameter to the two systems, so that $\Sigma_{\text{system 2}}/\Sigma_{\text{system 1}}$ could be calculated for a range of particle diameters. These investigations and their results and implications will be described in more detail in future publications in this journal.

5. Conclusions

Given the notorious difficulty in accurately quantifying total particle emissions from a fluctuating source (such as a CI engine operating in transient mode), the differences in the results obtained using the two systems tested here are relatively small, especially given the difference in accrued operating hours between the two systems. In some instances, test-to-test variation using the same vehicle and counting system was observed to be greater than the difference between systems 1 & 2. A large number of factors can influence particle number emissions, even over a defined legislative test cycle in a controlled laboratory environment, but it appears that the selection of either of the two particle counters used in this study will exert a much smaller influence than other factors. It is recognized as an unfortunate but as yet unavoidable fact that errors involved in the measurement of particulates are larger than those involved in measuring gaseous components [11]. At the current particle number limit, usage of either System 1 or System 2 exerts a limited impact on results. The Euro 6 proposal currently has the same PN limit as Euro 5+ (6.00×10^{11} #/km), and it is unclear whether this limit will be reduced in the next round of light-duty emissions legislation. If the limit were reduced, the small difference between the two systems reported here would become somewhat more significant. In the longer term, if the PN limit was significantly reduced (e.g. 6.00×10^{10} #/km), this might require a more closely-specified particle counting setup and

przewodu, przez który ona przepływa wynosi około 115 °C dla pierwszego systemu oraz 12 °C dla systemu 2. Wskazane różnice wydają się wiarygodnym wytłumaczeniem zaobserwowanych wskazań liczników cząstek. Jednakże badania opisane w niniejszym artykule nie tłumaczą jednoznacznie przyczyn, natury i lokalizacji źródła zaobserwowanych różnic wskazań pomiarowych. Stosunkowo mała, ale relatywnie powtarzająca się różnica w pomiarach opisana powyżej powinna być przedmiotem dalszych analiz. Występowanie cząstek o różnych średnicach w spalinach na wylocie z każdego z tych dwu systemów pomiarowych mogłoby dawać dalsze informacje o mechanizmach odkładania się cząstek na ściankach przewodów i strat w czasie próbkowania. Dodatkowo, cząstki obecne na wylocie z każdego systemu (droga powrotna przy próbkowaniu) mogą być przedmiotem badań, aby dokładniej określić straty próbkowania w obu porównywanych systemach pomiarowych. W celu określenia całkowitych strat cząstek przy próbkowaniu i poprawności wskazań obu systemów źródło stałej emisji cząstek stałych, o znanej liczbie PN, mogłoby być użyte tak, by wytwarzać cząstki stałe o znanej średnicy, które byłyby następnie próbkowane przez oba porównywane systemy pomiarowe. Wtedy suma cząstek byłaby obliczana dla danej ich średnicy. Tego typu badania są obecnie prowadzone, a ich wyniki będą przedstawione w dalszych pracach dotyczących tej tematyki badawczej.

5. Wnioski

Biorąc pod uwagę opisane trudności z dokładnością wyznaczania liczby cząstek stałych w warunkach dynamicznych, gdy podczas pracy silnika zmienia się jego prędkość i obciążenie, zaobserwowane różnice liczby cząstek stałych są nieduże, szczególnie gdy uwzględnimy różny okres ich użytkowania do prowadzenia pomiarów. W pewnych przypadkach badania powtarzane tym samym urządzeniem, na tym samym obiekcie dawały większe różnice niż te odnotowane przy pomiarach wykonywanych przez dwa testowane systemy. Na liczbę emitowanych cząstek stałych może mieć wpływ wiele czynników, również przebieg testu wykonywanego w warunkach laboratoryjnych, który jest opisany w regulacjach prawnych dotyczących pomiaru liczby cząstek stałych w spalinach. Z zaprezentowanych badań wynika, że zastosowanie któregośkolwiek systemu pomiarowego ma mniejszy wpływ na uzyskane wyniki badań niż inne czynniki. Za niekorzystny efekt jest uznane również to, że błąd powstający w czasie pomiaru PN jest większy niż w czasie pomiaru poziomu emisji gazowych związków w spalinach. Uwzględniając obecny limit liczby cząstek stałych, użycie pierwszego lub drugiego systemu pomiarowego ma niewielkie znaczenie – są one porównywalne. W propozycji normy Euro 6 zapisano taki sam limit liczby cząstek stałych jak w normie Euro 5+ (6×10^{11} km⁻¹). Obecnie nie wiadomo, kiedy będzie on zmniejszony dla pojazdów LDV. Jednak, jeżeli limit ten będzie znacznie zmniejszony w przyszłości, to nawet niewielkie różnice zaobserwowane dla testowanych systemów pomiarowych mogą mieć już istotne znaczenie dla dokładności pomiarów. W dłuższej perspektywie, jeżeli limity liczby cząstek stałych zostaną znacznie zmniejszone (np. 6×10^{10} km⁻¹), może będzie to wymagało doprecyzowania

test procedure: a proscribed system layout, uniform sample tubing lengths, fixed dilution settings, reduced temperature ranges, harmonized purging procedures, etc.

specyfikacji urządzeń pomiarowych i testów pomiarowych, np. ujednoczenie długości przewodów poboru spalin, określenie współczynnika rozcieńczenia, zmniejszenie zakresu temperatury, ujednoczenie procedury przepłukania systemu pomiarowego itd.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2007 on type approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe, Addendum 82: Regulation No. 83, last updated 26.04.2011.
- [3] Bielaczyc P.: Development of automotive fuels and fuel test methods in response to new emissions reduction and CO2 legislation. Euro Oil & Fuel Conference, Krakow, Poland, 24 November 2010.
- [4] De Filippo A.: Particle Size and Number Emissions from Modern Light-Duty Diesel Vehicles. SAE paper 2011-01-0632, 2011.
- [5] System 1 instruction manual, as provided by the manufacturer.
- [6] System 2 instruction manual, as provided by the manufacturer.
- [7] Giechaskiel B., Dilara P., Sandbach E., Andersson J.: Particle measurement programme (PMP) light-duty inter-laboratory exercise: comparison of different particle number measurement systems. Meas. Sci. Technol. 19 (2008) 095401, 2008.
- [8] TSI 3790 CPC Instruction manual.
- [9] ACEA Diesel Vehicle Particle Number Round Robin Test, UTAC test report 09/00003, 2009. Available online: ec.europa.eu/transport
- [10] Bielaczyc P., Szczotka A., Pajdowski P., Woodburn, J.: Development of vehicle exhaust emission testing methods – BOSMAL's new emission testing laboratory. Combustion Engines, 1/2011 (144), 2011.
- [11] Kirchner U., Vogt R., Maricq M.: Investigation of EURO-5/6 Level Particle Number Emissions of European Diesel Light Duty Vehicles. SAE paper 2010-01-0789, 2010.
- [12] Chiou M.C.: Effect of thermophoresis on submicron particle deposition from a forced laminar boundary layer flow onto an isothermal moving plate. Acta Mechanica, 129, 3-4, 219-229, 1998.
- [13] Montassier N., Boulaud D., Renoux A.: Experimental study of thermophoretic particle deposition in laminar tube flow. Journal of Aerosol Science, 22, 5, 677-687, 1991.

Abbreviations/Skróty i oznaczenia

PMP	Particulate measuring protocol/zasady pomiaru cząstek	NEDC	New european driving cycle/nowy europejski cykl jezdny
PM	Particulate matter/cząstki stałe	LDV	Light duty vehicle/lekki samochód użytkowy
PN	Particulate number/liczba cząstek stałych	PTS	Particle transfer system/system przepływu cząstek stałych
EU	European Union/Unia Europejska	VPR	Volatile particle reductor/reduktor (odparowywacz) lotnych cząstek
CI	Compression ignition/zapłon samoczynny	PND	Particulate number diluters/przewody rozcieńczania spalin
DPF	Diesel particulate filter/filtr cząstek stałych	ET	Evaporation tube/przewód do odparowania
PPM	Parts per million/cząstek na milion		
CPC	Condensation particle counters/licznik kondensacyjny cząstek stałych		

Piotr Bielaczyc, DEng. – head of the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Piotr Bielaczyc – kierownik Zakładu Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.bielaczyc@bosmal.com.pl



Piotr Pajdowski, DEng. – doctor in the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Piotr Pajdowski – adiunkt w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.pajdowski@bosmal.com.pl



Prof. Jerzy Merkisz, DSc., DEng. – Professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznan University of Technology.

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

e-mail: jerzy.merkisz@put.poznan.pl



Joseph Woodburn, MSc. – researcher at the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Mgr inż. Joseph Woodburn – inżynier ds. badań w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.



Valve steel oxidation rate in the exhaust gases of diesel engines fueled with 5% biocomponent diesel oil

Out of the many components of four-stroke diesel engines the exhaust valves are under significant constant thermal and mechanical loads. They operate in a highly corrosive environment of hot exhaust gases. The durability of these elements is determined by the creep resistance of steel i.e. simultaneous resistance to mechanical deformations under high temperatures and the resistance of the surface to corrosive hot exhaust gases.

Long term cyclic heating and burning of the exhaust valves in the exhaust gases whose main components are oxygen, carbon dioxide and superheated steam results in a simultaneous corrosion of the steel surface and core diffusion of carbon and alloy elements in the thin layer of the steel surface. In extreme operating conditions this may lead to a deformation of the exhaust valves, a reduction of the air tightness of the combustion chamber or damage or destruction of the engine.

The paper discusses the results of investigations of the influence of Cr, Ni, Mn and Si on the oxidation rate of high alloy austenitic valve steel in the diesel oil exhaust gases containing 5% of biocomponents. The corrosion tests were conducted in the temperate of 973 K and 1173 K under the conditions simulating the operation of the exhaust valves in diesel engines under heavy thermal loads.

Based on the conducted research significant influence of the said alloy elements on the oxidation rate of the valve steel in the exhaust gases has been observed. The tests were conducted on the engine durability test stand in Automotive Research and Development Institute BOSMAL in Bielsko-Biala.

Key words: valve steel, diesel exhaust gases, oxidation rate

Szybkość utleniania stali zaworowych w gazach spalinowych oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów

Spośród licznych elementów konstrukcyjnych czterosurowych silników spalinowych o zapłonie samoczynnym zawory wylotowe należą do silnie obciążonych cieplnie i mechanicznie. Poza tym pracują w niezwykle agresywnym korozyjnie środowisku gorących gazów spalinowych. O trwałości tych elementów decyduje żarowytrzymałość stali, tj. jednoczesna odporność zaworów na odkształcenia mechaniczne w wysokich temperaturach oraz odporność powierzchni na wysoko-temperaturowe korozyjne oddziaływanie gorących gazów spalinowych.

Długookresowe cykliczne nagrzewanie i wygrzewanie zaworów wylotowych w atmosferze spalin oleju napędowego, gdzie głównymi składnikami utleniającymi są tlen, dwutlenek węgla i przegrzana para wodna, powoduje jednoczesną korozję powierzchni stalowej oraz odrzniętą dyfuzję węgla i pierwiastków stopowych w cienkiej warstwie przypowierzchniowej stali. W skrajnych warunkach eksploatacyjnych może to prowadzić do odkształcenia zaworów wylotowych, zmniejszenia szczelności komory spalania i uszkodzenia lub zniszczenia silnika spalinowego.

W artykule omówiono wyniki badań wpływu Cr, Ni, Mn i Si na szybkość utleniania wysokostopowych austenitycznych stali zaworowych w gazach spalinowych oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów. Badania korozyjne prowadzono w temperaturze 973 i 1173 K w warunkach symulujących pracę zaworów wylotowych w wysokoobciążonych cieplnie silnikach o zapłonie samoczynnym.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono duży wpływ wymienionych pierwiastków stopowych na szybkość utleniania stali zaworowych w gazach spalinowych silnika. Badania wykonano na stanowisku badań trwałościowych silników w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej.

Słowa kluczowe: stal zaworowa, spaliny oleju napędowego, szybkość utleniania

1. Introduction

The exhaust valves controlling the air tightness of the combustion chamber and the flow of highly corrosive hot exhaust gases to the exhaust manifold have great impact on the durability and operational parameters of combustion engines and their exhaust systems including catalytic converters.

The measurements of the temperatures of the exhaust valves operating in diesel engines under high thermal and

1. Wprowadzenie

Zawory wylotowe, decydując o szczelności komory spalania oraz przepływie niezwykle agresywnych korozyjnie gorących gazów spalinowych do układu wydechowego, wywierają duży wpływ na trwałość i walory eksploatacyjne silników spalinowych oraz układów wydechowych i katalizatorów spalin.

Pomiary temperatur zaworów wylotowych pracujących w wysokoobciążonych cieplnie i mechanicznie silnikach o

mechanical loads have shown that the exhaust gases flowing out of the cylinder with the velocity of approximately 560 to 670 m/s and temperature of approximately 1000 K to 1273 K heat up the valve heads of the modern bimetallic exhaust valves in diesel engines to the temperature of approximately 1050 K [2].

In order to ensure high creep resistance of the exhaust valve i.e. great resistance to heat in a highly corrosive environment of the diesel exhaust gases [3] (Tab. 1) including high resistance to low and high temperature creeping [4] the valve heads of moderns bimetallic exhaust valves are usually made from four types of high alloy austenitic valve steel of the chemical composition and mechanical properties given in Table 2 and 3.

zapłonem samoczynnym wykazały, że wypływające z cylindra przez szczelinę wylotową między przylgnięciem zaworową a gniazdem zaworowym z prędkością od ok. 560 do ok. 670 m/s gazy spalinowe o temperaturze od ok. 1000 do ok. 1273 K nagrzewają grzybki współczesnych bimetalicznych zaworów wylotowych silników o zapłonie samoczynnym do temperatury ok. 1050 K [2].

W celu zapewnienia wysokiej żarowytrzymałości zaworów wylotowych, tj. wysokiej żaroodporności w silnie utleniającym środowisku gorących gazów spalinowych oleju napędowego [3] (tab. 1) oraz wysokiej odporności na nisko- i wysokotemperaturowe pełzanie [4], grzybki współczesnych bimetalicznych zaworów wylotowych wytwarzane są zazwyczaj z czterech gatunków wysokostopowych austenitycznych

Table 1. Average value of the oxidizers in the diesel exhaust gases [3]

Tabela 1. Średnia zawartość utleniaczy w spalinach silników o zapłonie samoczynnym [3]

Exhaust gas component, % vol./składnik gazów spalinowych, % obj.		
Oxygen/tlen	Carbon monoxide/tlenek węgla	Steam/para wodna
2.0 – 18.0	0.5 – 4.0	0.01 – 0.5

Table 2. Chemical composition of steel used for the production of exhaust valves for gasoline and diesel engines [5]

Tabela 2. Skład chemiczny stali stosowanych do produkcji zaworów wylotowych silników o zapłonie iskrowym i samoczynnym [5]

Type of steel/ gatunek stali	Chemical composition/skład chemiczny, %						
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Nb	W
X33CrNiMn	0.28–0.38	22.0–24.0	7.00–9.00	1.5–3.5	0.50–1.00	–	–
X50CrMnNiNb	0.45–0.55	20.0–22.0	3.50–5.50	8.0–10.0	< 0.45	1.80–2.50	0.80–1.50
X53CrMnNi	0.48–0.58	20.0–23.0	3.25–4.50	8.0–10.0	< 0.25	–	–
X55CrMnNi	0.50–0.60	19.5–21.5	1.50–2.75	7.0–10.0	< 0.25	–	–

The mentioned types of steel also contain < 0,05% P, < 0,04% S and up to approximately 0,20 to 0,60% N

Table 3. Mechanical properties of valve steel in the ambient temperature [5]

Tabela 3. Właściwości mechaniczne stali zaworowych w temperaturze pokojowej [5]

Type of steel/ gatunek stali	Thermal processing/ obróbka cieplna	Structure/struktura	Mechanical properties/właściwości mechaniczne			
			Rm [N/mm ²]	Re _{(0.2)min} [N/mm ²]	A _{min} [%]	Z _{min} [%]
X33CrNiMn	Quenched and aged/ przesycony i starzony	Austenite with miniscule evolution of high-dispersion M23C6 carbides/ austenit z drobnymi o dużej dyspersji wydzieleniami węglików typu M23C6	880 – 1080	540	10	10
X50CrMnNiNb			950 – 1200	600	8	10
X53CrMnNi			980 – 1180	590	8	10
X55CrMnNi			980 – 1180	590	8	10

Numerous durability tests conducted in Automotive Research and Development Institute BOSMAL in Bielsko-Biała on gasoline and diesel combustion engines and the analyses of the reasons for the damage of the exhaust valves have shown that one of the important causes of destruction of the exhaust valves under heavy thermal and mechanical loads, aside from the defective structure of the padded stellite on the valve seat, may be the process of long term burning in a highly oxidizing environment of the hot exhaust gases. The conditions of cyclically variable tensions and thermal shocks as well as surface oxidation and diffusive decrement of the

stali zaworowych, o składzie chemicznym oraz właściwościach mechanicznych podanych w tab. 2 i 3.

Prowadzone w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej liczne badania trwałościowe silników spalinowych o zapłonie iskrowym i samoczynnym oraz analizy przyczyn uszkodzenia zaworów wylotowych wykazały, że jedną z ważnych przyczyn niszczenia wysokoobciążonych cieplnie i mechanicznie zaworów wylotowych, poza wadliwą strukturą warstwy napawanego na przylgnięciu zaworowe stellite, może być także proces długookresowego wygrzewania zaworów w silnie utleniającym środowisku



Fig. 1. Gasoline and diesel combustion engines test bed in Automotive Research and Development Institute BOSMAL Sp. z o. o. in Bielsko-Biala

Rys. 1. Stanowisko do badań silników spalinowych o zapłonie iskrowym i samoczynnym w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o. o. w Bielsku-Białej

concentration of carbon and other alloy elements in the thin surface layers of steel may lead to a reduction of the working diameter of the valve plates and heads and subsequently to a deformation of the exhaust valves, hence a damage or destruction of the whole engine (Fig. 1).

2. Own research

The investigations into the rate of oxidation of valve steel in the exhaust gases of a turbocharged four-cylinder diesel engine were conducted on the samples in the form of disks of the diameter of approximately 16 and 19 mm and the thickness of approximately 1 mm. The samples were taken through turning bars of the diameters of approximately 17 and 20 mm respectively. The bars were made from industrial high alloy austenitic valve steel X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 of the chemical composition given in Table 4.

The Samples tested for the oxidation rate after boring holes $\Phi 2$ at a distance of approximately 2 mm from the edge were sanded and buffed using appropriate sand papers and abrasive compounds, cleaned with methanol and dried with pressurized air. After the said actions the samples were measured with a caliper (accuracy 0.01 mm) and weighed (accuracy 10^{-4} g) in an air-conditioned room. Then the samples

gorących gazów spalinowych. W warunkach cyklicznie zmiennych naprężeń i wstrząsów cieplnych oraz jednoczesnego powierzchniowego utleniania i dyfuzyjnego zmniejszenia stężenia węgla i pierwiastków stopowych w cienkich warstwach przypowierzchniowych stali może on prowadzić do zmniejszenia przekroju czynnego talerzyków i grzybków zaworowych, a następnie do odkształcenia zaworów wylotowych i uszkodzenia lub zniszczenia silnika spalinowego (rys. 1).

2. Badania własne

Badania szybkości utleniania stali zaworowych w gazach spalinowych turboładowanego czterocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym prowadzono na próbkach w postaci dysków o średnicy ok. 16 i 19 mm i grubości ok. 1 mm. próbki pobrano metodą toczenia z prętów o średnicy odpowiednio ok. 17 i 20 mm z przemysłowego wytopu wysokostopowych austenitycznych stali zaworowych X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 o składzie chemicznym podanym w tab.4.

Próbki do badań szybkości utleniania po nawierceniu otworków $\Phi 2$ w odległości ok. 2 mm od krawędzi szlifowano i polerowano z wykorzystaniem odpowiednich papierów i past polerskich, po czym myto alkoholem metylowym i suszono w strumieniu sprężonego powietrza. Po wymienionych zabiegach próbki mierzono suwmiarką z dokładnością 0,01 mm i ważono z dokładnością 10^{-4} g w klimatyzowanym pomieszczeniu, a następnie wieszano na kanthalowych haczykach i wraz z oprzyrządowaniem wkładano do szklanej rury reaktora (rys. 2).

Utlenianie próbek w gazach spalinowych oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów, tj. estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych, prowadzono w warunkach kolejnych cyklicznych wstrząsów cieplnych. Symulowano pracę zaworów wylotowych w silniku o zapłonie samoczynnym przez szybkie nagrzewanie próbek w reaktorze do temperatury 973 K oraz do temperatury 1173 K, po czym wygrzewano próbki w wymienionych temperaturach przez 2 godz. i chłodzono przez 25 min w temperaturze pokojowej (rys. 3).

Natomiast szybkość utleniania stali zaworowych w warunkach cyklicznych wstrząsów cieplnych [6] w gazie

Table 4. The chemical composition of the tested valve steel types

Tabela 4. Skład chemiczny badanych stali zaworowych

Steel/stal	Chemical composition/skład chemiczny, %									
	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	W	N	S	P
X33CrNiMn N238	0.35	23.40	7.82	3.30	0.63	0.11	0.02	0.28	< 0.005	0.014
X53CrMnNi N208	0.53	20.50	4.10	10.30	0.30	0.12	–	0.41	< 0.005	0.040
X55CrMnNi N208	0.55	20.30	2.08	7,57	0.17	0.11	–	0.38	< 0.005	0.040

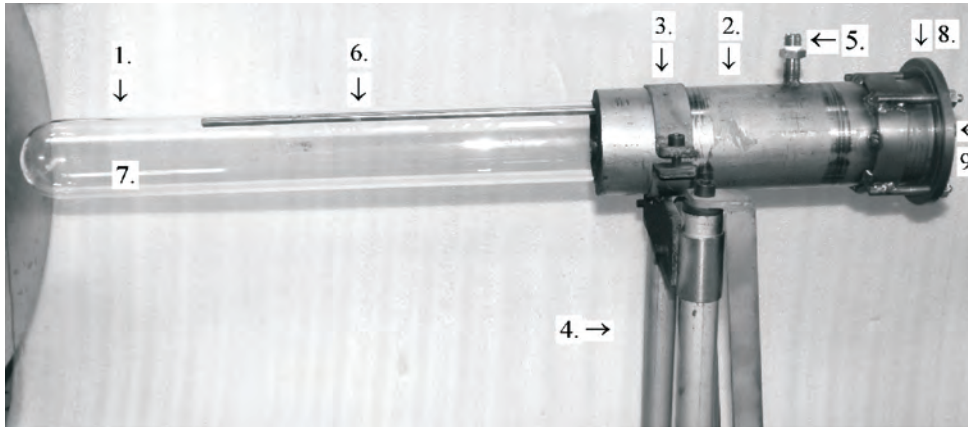


Fig. 2. Reactor for the testing of the oxidation rate of valve steel in the diesel exhaust gases: 1 – reactor, 2 – steel reactor case, 3 – mounting of the reactor to the support, 4 – support fixing and leveling the reactor, 5 – exhaust gases feed to the reactor, 6 – steel pipe distributing the exhaust gases in the reactor, 7 – sample oxidation spot, 8 – bolt-fixed input window, 9 – exhaust gases outlet

Rys. 2. Reaktor do badania szybkości utleniania stali zaworowych w gazach spalinowych silnika o zapłonie samoczynnym: 1 – reaktor; 2 – stalowa obudowa reaktora, 3 – uchwyt mocujący reaktor do stojaka, 4 – stojak mocujący i poziomujący reaktor; 5 – doprowadzenie spalin do reaktora, 6 – stalowa rurka rozprowadzająca spaliny w reaktorze, 7 – miejsce utleniania próbek, 8 – mocowane śrubami okno wsadowe, 9 – odprowadzenie spalin

were hung on a kanthal hooks and together with the testing equipment put in the glass pipe of the reactor (Fig. 2).

The oxidation of the samples in the diesel exhaust gases with the 5% content of biocomponents i.e. methyl esters of higher fatty acids, were conducted in the conditions of subsequent thermal shocks. The operation of the diesel engine exhaust valves was simulated through a quick heating up of the samples in the reactor to the temperature of 973 K and 1173 K. The samples were burned in these temperatures for two hours and subsequently chilled for 25 min in the ambient temperature (Fig. 3).

The valve steel oxidation rate under the conditions of cyclic thermal shocks [6] in the diesel exhaust gases with the 5% content of biocomponents was analyzed with the method of increment or decrement of the sample mass as a function of oxidation time (commonly applied in research into metal and alloy oxidation kinetics) [7, 8]. The mass of the tested samples was measured in the preset time intervals i.e. every 25 hours up to 200 hours of oxidation and then every 50 hours until the end of the oxidation process. The oxidized samples after removal from the reactor chamber were chilled to the ambient temperature, cleaned from the scales with pressurized air and weighed in an air-conditioned room (accuracy 10^{-4} g). The oxidation rate of the tested valve steel was determined through the measurement of the increment or decrement of the mass of the tested samples Δm in relation to the initial surface parameters of samples S in $[g/cm^2]$. The measurement results were compared to oxidation time t [hours] in the reactor chamber.

spalinowym oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów analizowano, powszechnie stosowaną w badaniach kinetyki utleniania metali i stopów, metodą pomiaru przyrostu lub ubytku masy próbek w funkcji czasu utleniania [7, 8]. Masę utlenianych próbek badano w z góry ustalonych odstępach czasu, tj. co 25 godz. do 200 godz. utleniania i dalej co 50 godz. do końca procesu utleniania. Utleniane próbki po wyjęciu z komory reaktora chłodzono do temperatury pokojowej, po czym czysz-

czono strumieniem sprężonego powietrza z odpadającej zgorzeliny i ważono w klimatyzowanym pomieszczeniu z dokładnością 10^{-4} g. Szybkość utleniania badanych stali zaworowych wyznaczano, mierząc przyrost lub ubytek masy utlenianych próbek Δm w odniesieniu do powierzchni początkowej próbek S w $[g/cm^2]$, a następnie wyniki pomiarów odnoszono do czasu utleniania próbek t [godz.] w komorze roboczej reaktora.

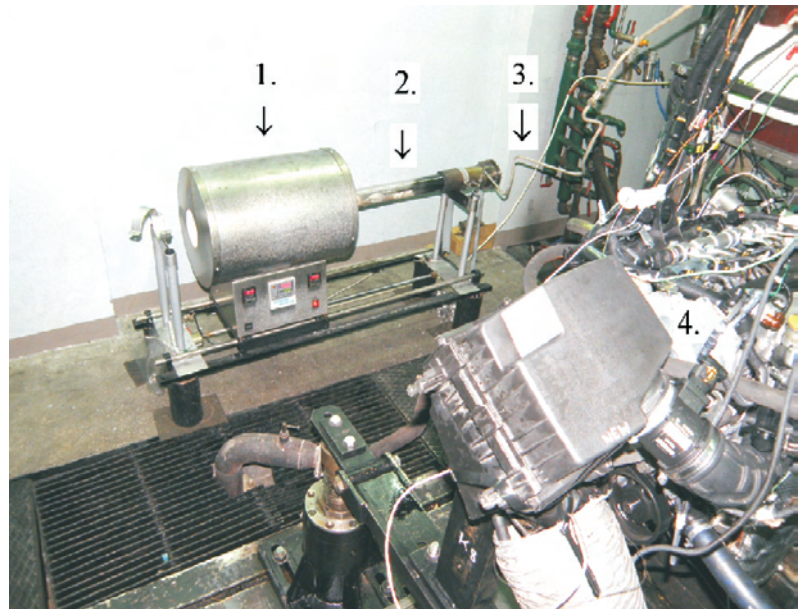


Fig. 3. Test stand for the testing of the oxidation rate of valve steel in the diesel exhaust gases: 1 – reactor heater, 2 – reactor, 3 – pipe feeding the exhaust gases from the manifold to the reactor, 4 – diesel engine on the durability test stand

Rys. 3. Stanowisko do badań szybkości utleniania stali zaworowych w gazach spalinowych oleju napędowego: 1 – piec nagrzewający reaktor; 2 – reaktor; 3 – rurka doprowadzająca spaliny z kolektora spalin do reaktora, 4 – silnik o zapłonie samoczynnym na stanowisku badań trwałościowych

3. Discussion

The conducted tests of the oxidation kinetics of high alloy valve steel X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 in the diesel exhaust gases have shown an extremely low oxidation rate of the steel with the lowest mechanical parameters X33CrNiMnN238 and highest content of Cr, Ni and Si (23.40; 7.82 and 0.63% respectively) as well as of

3. Omówienie wyników badań

Przeprowadzone badania kinetyki utleniania wysokostopowych austenitycznych stali zaworowych X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 w gazach spalinowych wykazały niezwykle małą szybkość utleniania stali o najniższych, spośród badanych stali zaworowych, właściwościach mechanicznych X33CrNiMnN238

i największej zawartości Cr, Ni i Si (odpowiednio 23,40; 7,82 i 0,63%) oraz najmniejszej zawartości manganu 3,30%. Badania kinetyki utleniania wykazały, że w początkowym okresie procesu utleniania szybkość utleniania stali X33CrNiMnN238 mierzona zmianą masy próbek w funkcji czasu utleniania w temperaturze 973 K zwiększa się niezwykle łagodnie, tj. o ok. 0,0002 g/cm² po 72 godz. utleniania, po czym pozostaje niezmienna, pomimo dalszego zwiększania czasu utleniania do 600 godz. i liczby wstrząsów cieplnych do ok. 250 cykli (rys. 4 krzywa 1a i rys. 5). Większe szybkości utleniania w gazach spalinowych w temperaturze 973 K wykazały natomiast stale o nieco wyższych właściwościach mechanicznych X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 oraz odpowiednio mniejszej zawartości chromu 20,50 i 20,30%, niklu odpowiednio 4,10 i 2,08% i krzemu 0,30 i 0,17%, oraz odpowiednio większej zawartości manganu 10,30 i 7,57%. Badania wykazały, że średni ubytek masy próbek wykonanych ze stali X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 w wyniku kolejnych wstrząsów cieplnych oraz intensywnego pęknięcia i odpadania zgorzeliwy zwiększał się parabolicznie odpowiednio do ok. 0,0824 g/cm² i do ok. 0,2155 g/cm² wraz z

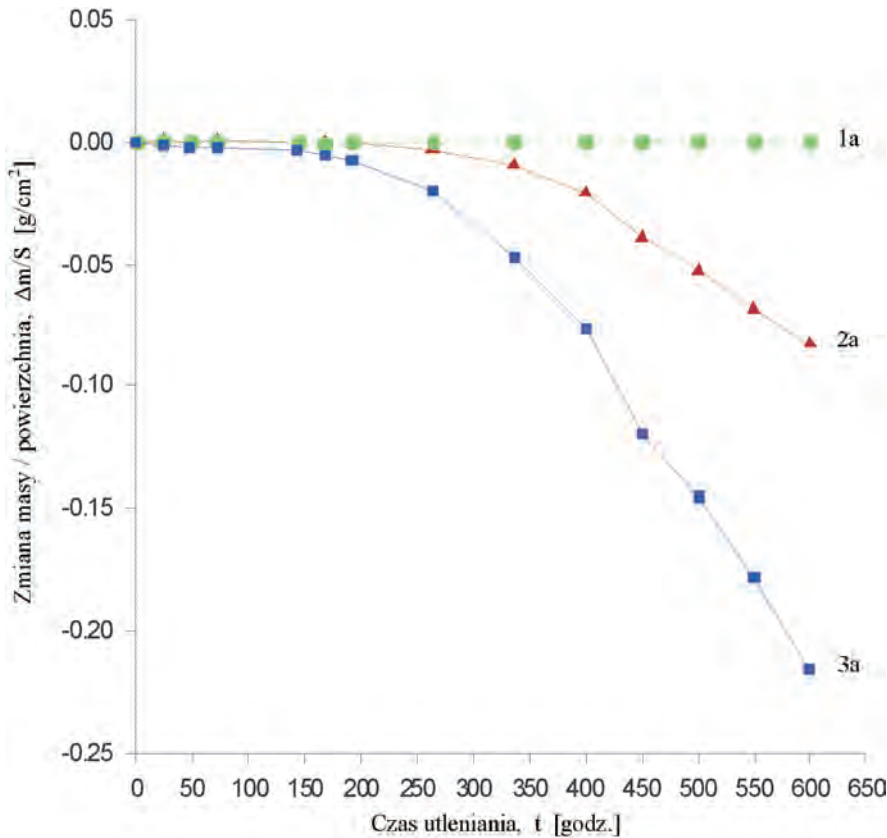


Fig. 4. The oxidation rate of high alloy austenitic valve steel: 1a – X33CrNiMnN238, 2a – X53CrMnNiN208, 3a – X55CrMnNiN208. The samples were oxidized in diesel exhaust gases with 5% content of biocomponents under the conditions of cyclic thermal shocks at the temperature of 973 K/600 hours

Rys. 4. Szybkość utleniania wysokostopowych austenitycznych stali zaworowych: 1a – X33CrNiMnN238, 2a – X53CrMnNiN208, 3a – X55CrMnNiN208. Próbkę utleniano w gazie spalinowym oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów w warunkach cyklicznych wstrząsów cieplnych w temperaturze 973 K/600 godz.

the lowest content of manganese (3.30%). The tests on the oxidation kinetics have shown that in the initial phase of the oxidation process the oxidation rate of X33CrNiMnN238 measured through the change of the sample mass as a function of oxidation time in the temperature of 973 K increases extremely smoothly i.e. by approximately 0,0002 g/cm² after 72 hours of oxidation and then remains unchanged despite further extension of the oxidation time to 600 hours and the number of thermal shocks to approximately 250 cycles (Fig. 4 curve 1a and Fig. 5). Greater oxidation rates in the diesel

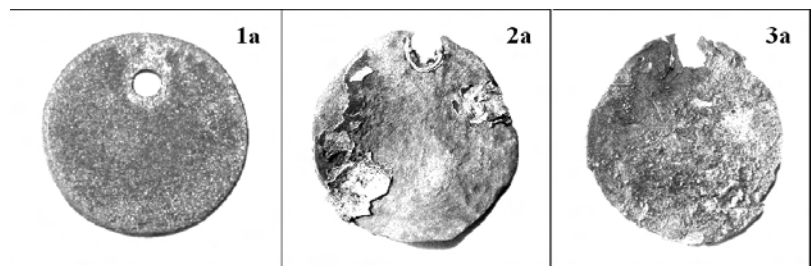


Fig. 5. Macroscopic image of the surface of the tested samples after oxidation in the diesel exhaust gases in the temperature of 973 K/600 hrs.: 1a – X33CrNiMnN238, 2a – X53CrMnNiN208, 3a – X55CrMnNiN208

Rys. 5. Makroskopowy obraz powierzchni próbek po utlenieniu w gazie spalinowym oleju napędowego w temperaturze 973 K/600 godz.: 1a – X33CrNiMnN238, 2a – X53CrMnNiN208, 3a – X55CrMnNiN208

exhaust gases in the temperature of 973 K occurred for steel types of higher mechanical parameters – X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 of lower chromium content (20.50 and 20.30% respectively), nickel (4.10 and 2.08% respectively), silicon (0.30 and 0.17% respectively) and higher content of manganese (10.30 and 7.57% respectively). The tests have shown that an average decrement of mass of the samples made from X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 as a result of subsequent thermal shocks and intense cracking and chipping off of the scales increased parabolically to approximately 0.0824 g/cm² and 0.2155 g/cm² respectively along with a simultaneous increase of the oxidation time to 600 hours and the cyclic thermal shocks to 250 (Fig. 4 curves 2a and 3a respectively and Fig. 5).

Further analysis of the oxidation kinetics of the valve steel X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 has shown minuscule influence of the temperature of the diesel exhaust gases from 973 K to 1173 K on the oxidation rate of steel of the highest Cr, Ni and Si content and the lowest content of Mn i.e. high alloy austenitic valve steel X33CrNiMnN238. The analysis of the oxidation kinetics has shown that in the beginning of the oxidation process in the

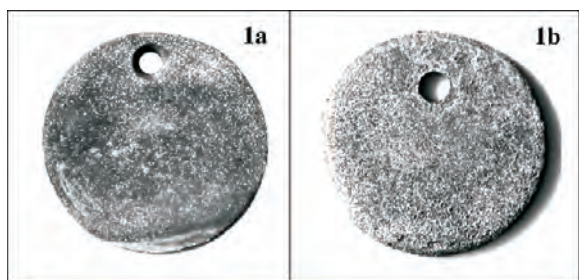


Fig. 7. Macroscopic image of the surface of the X33CrNiMnN238 samples after oxidation in the diesel exhaust gases in the temperature of 1a 973 K/600 hours and 1b – 1173 K/550 hours

Rys. 7. Makroskopowy obraz powierzchni próbek stali zaworowej X33CrNiMnN238 po utlenieniu w gazie spalinowym oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów w temperaturze: 1a – 973 K/600 godz. i 1b – 1173 K/550 godz

temperature of 1173 K the average mass of the samples made from the said steel increased smoothly by approximately 0.00056 g/cm² after 72 hours of oxidation and then the average mass of the samples reduced smoothly as the oxidation time was extended to 150 hours. After another 50 hours of oxidation an abrupt reduction of the mass occurred to the mass of approximately 0.0151 g/cm². Further extension of the oxidation time in the exhaust gases resulted in an extremely smooth decrement of the average mass of the samples to approximately 0.0234 g/cm² after 550 hours of oxidation in the temperature of 1173 K (Fig. 6 curve 1b and Fig. 7).

The increase in the temperature of the diesel exhaust gases by 100 K i.e. from 973 to 1173 K exerted an extremely strong influence on the oxidation rate of steel of slightly higher mechanical properties – X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 and lower content of chromium (20.50 and 20.30% respectively), nickel (4.10 and 2.08% respectively) silicon (0.30 and 0.17% respectively) and higher content

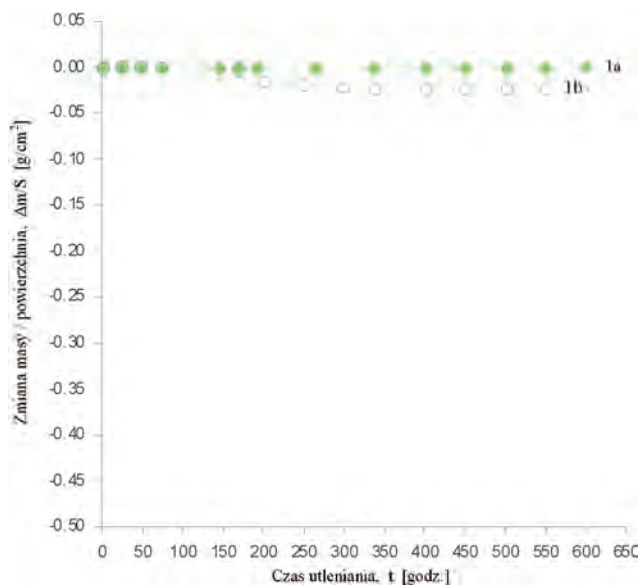


Fig. 6. The oxidation rate of high alloy austenitic valve steel X33CrNiMnN238. The samples were oxidized in diesel exhaust gases with 5% content of biocomponents under the conditions of cyclic thermal shocks at the temperature of 1a 973 K/600 hours and 1b – 1173 K/550 hours

Rys. 6. Szybkość utleniania wysokostopowej austenitycznej stali zaworowej X33CrNiMnN238 w gazie spalinowym oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów w warunkach cyklicznych wstrząsów cieplnych w temperaturze: 1a – 973 K/600 godz. i 1b – 1173 K/550 godz.

jednocześnie zwiększeniem czasu utleniania do 600 godz. oraz cyklicznych wstrząsów cieplnych do 250 cykli (rys.4 krzywe odpowiednio 2a i 3a i rys.5):

Dalsza analiza kinetyki utleniania stali zaworowych X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 wykazała natomiast niewielki wpływ podwyższenia temperatury gazów spalinowych oleju napędowego z 973 K do 1173 K na szybkość utleniania stali o największej zawartości Cr, Ni i Si oraz najmniejszej zawartości Mn, tj. wysokostopowej austenitycznej stali zaworowej X33CrNiMnN238. Analiza kinetyki utleniania wykazała, że w początkowym okresie procesu utleniania w temperaturze 1173 K średnia masa próbek wykonanych z wymienionej stali zaworowej zwiększyła się łagodnie o ok. 0,00056 g/cm² po 72 godz. utleniania, po czym średnia masa próbek zmniejszała się początkowo łagodnie wraz ze zwiększeniem czasu utleniania do 150 godz. Po upływie kolejnych 50 godz. utleniania nastąpiło skokowe zmniejszenie masy próbek do wartości ok. 0,0151 g/cm². Dalsze zwiększanie czasu utleniania próbek w gazach spalinowych powodowało natomiast niezwykle łagodny ubytek średniej masy próbek do ok. 0,0234 g/cm² po 550 godz. utleniania w temperaturze 1173 K (rys.6 krzywa 1b i rys.7).

Podwyższenie temperatury gazów spalinowych oleju napędowego o 100 K, tj. z 973 do 1173 K, wywarło niezwykle silny wpływ na szybkość utleniania stali o nieco wyższych właściwościach mechanicznych X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 oraz mniejszej zawartości chromu odpowiednio 20,50 i 20,30%, niklu 4,10 i 2,08% i krzemu 0,30 i 0,17% oraz większej zawartości manganu odpowiednio 10,30 i 7,57%. Próbki w wyniku kolejnych cyklicznych

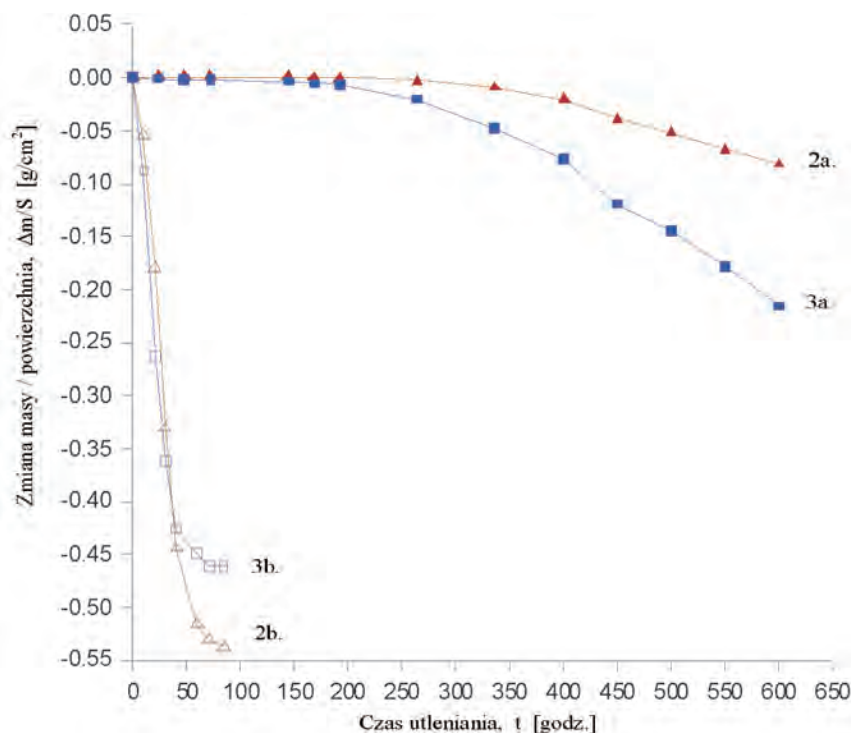


Fig. 8. Oxidation rate of high alloy valve steel: 2 – X53CrMnNiN208 and 3 – X55CrMnNiN208 in the diesel exhaust gases with 5% content of biocomponents under the conditions of cyclic thermal loads in the temperature of: a – 973 K/600 hours and b – 1173 K/80 hours

Rys. 8. Szybkość utleniania wysokostopowych stali zaworowych:

2 – X53CrMnNiN208 i 3 – X55CrMnNiN208 w gazie spalinowym oleju napędowego z dodatkiem 5% biokomponentów w warunkach cyklicznych wstrząsów cieplnych w temperaturze: a – 973 K/600 godz. i b – 1173 K/80 godz.

of manganese (10.30 and 7.57% respectively). The samples as a result of subsequent cyclic thermal shocks and intense cracking and chipping off of the scales in the exhaust gases in the temperature of 1173 K were entirely destroyed after approximately 80 hours of oxidation i.e. after approximately 33 thermal cycles (Fig. 8 curves 2b and 3b and Fig. 9).

4. Conclusions

The performed investigations into the oxidation rate of high alloy austenitic valve steel X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 in the diesel

wstrząsów cieplnych oraz intensywnego pęknięcia i odpadania zgorzeliny w gazach spalinowych o temperaturze 1173 K uległy całkowitej destrukcji po ok. 80 godzinach utleniania, tj. po ok. 33 cyklach cieplnych (rys. 8 krzywe odpowiednio 2b i 3b i rys. 9).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania szybkości utleniania wysokostopowych austenicznych stali zaworowych X33CrNiMnN238, X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 w gazach spalinowych oleju napędowego z dodatkiem 5% estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych wykazały, że najmniejszą szybkość utleniania w warunkach cyklicznych wstrząsów cieplnych w temperaturze 973 K i 1173 K ma stal o najniższych, spośród badanych stali zaworowych, właściwościach mechanicznych X33CrNiMnN238 oraz największej zawartości Cr, Ni i Si odpowiednio 23,40; 7,82 i 0,63% oraz najmniejszej zawartości Mn 3,30% (rys. 9 krzywa odpowiednio 1a i 1b).

Badania szybkości utleniania wykazały także, że jednocześnie zwiększenie zawartości Mn z 3,30% do 10,30 i 7,57% [9] oraz zmniejszenie zawartości Cr z od 23,40% do 20,50 i 20,30%, tj. do wartości mniejszych od stężenia zapewniającego selektywne utlenianie Cr [10, 11] oraz zmniejszenie zawartości zwiększającego współczynnik dyfuzji Cr w stali Ni z od 7,82% do 4,10 i 2,08% [12] i Si z od 0,63% do 0,30 i 0,17% powoduje silne zwiększenie szybkości utleniania stali zaworowej X53CrMnNiN208 i X55CrMnNiN208 w temperaturze 973 K (rys. 10 krzywe odpowiednio 2a i 3a) oraz niemalże katastrofalne zwiększenie szybkości utleniania w temperaturze 1173 K (rys. 10 krzywe odpowiednio 2b i 3b).

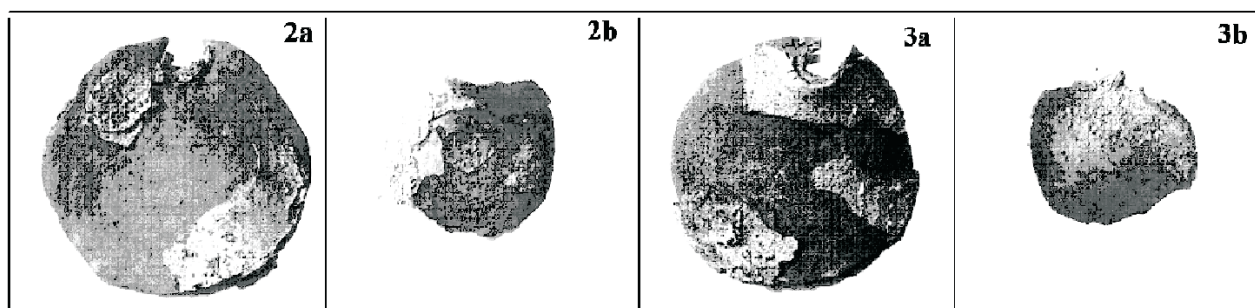


Fig. 9. Macroscopic image of the surface of the X53CrMnNiN208 sample after oxidation in the exhaust gases in the temperature of: 2a – 973 K/600 hours and 2b – 1173 K/80 hours and X55CrMnNiN208 sample after oxidation in the exhaust gases in the temperature of: 3a – 973 K/600 hours and 3b – 1173 K/80 hours

Rys. 9. Makroskopowy obraz powierzchni próbek stali X53CrMnNiN208 po utlenieniu w gazie spalinowym w temperaturze: 2a – 973 K/600 godz. i 2b – 1173 K/80 godz oraz stali X55CrMnNiN208 po utlenieniu w gazie spalinowym w temperaturze: 3a – 973 K/600 godz. i 3b – 1173 K/80 godz.

exhaust gases with a 5% content of methyl esters of higher fatty acids have shown that the lowest oxidation rate under the conditions of cyclic thermal loads in the temperature of 973 K and 1173 K has the steel of the lowest mechanical properties X33CrNiMnN238 and the highest content of Cr, Ni and Si (23.40; 7.82 and 0.63% respectively) and the lowest content of Mn (330%) (Fig. 9, curve 1a and 1b).

The investigations into the oxidation rate have also shown that a simultaneous increase in the Mn content from 3.30% to 10.30 and 7.57% [9] and the reduction of the content of Cr from 23.40% to 20.50 and 20.30% (i.e. the values lower than those ensuring selective oxidation of Cr [10, 11]) as well as a reduction of the content of Cr (increasing the diffusion coefficient) in the Ni steel from 7.82% to 4.10 and 2.08% [12] and Si from 0.63% to 0.30 and 0.17% results in a great increase in the oxidation rate of the valve steel X53CrMnNiN208 and X55CrMnNiN208 in the temperature of 973 K (Fig. 10 curves 2a and 3a) and an almost destructive increase of the oxidation rate in the temperature of 1173 K (Fig. 10 curves 2b and 3b).

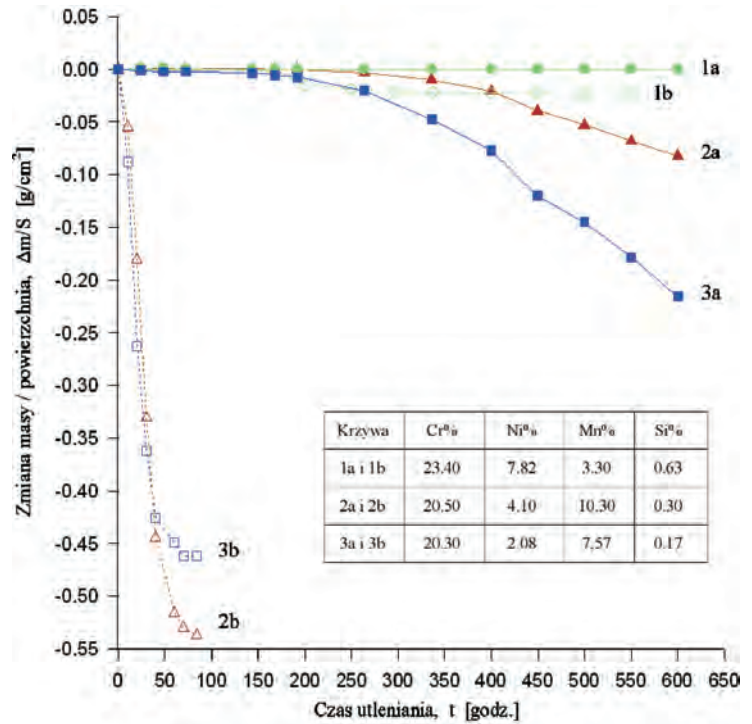


Fig. 10. Oxidation rate of austenitic high alloy steel: 1 – X33CrNiMnN238, 2 – X53CrMnNiN208 and 3 – X55CrMnNiN208 under the conditions of cyclic thermal shocks in the diesel exhaust gases containing 5% biocomponents in the temperature of: a – 973 K and b – 1173 K

Rys. 10. Makroskopowy obraz powierzchni próbek stali X53CrMnNiN208 po utlenieniu w gazie spalinowym w temperaturze: 2a – 973 K/600 godz. i 2b – 1173 K/80 godz oraz stali X55CrMnNiN208 po utlenieniu w gazie spalinowym w temperaturze: 3a – 973 K/600 godz. i 3b – 1173 K/80 godz.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Kasedorf J.: Zasilanie wtryskowe olejem napędowym. WKiŁ, Warszawa 1990.
- [2] Bernhardt M., Dobrzyński S., Loth E.: Silniki spalinowe. WKiŁ, Warszawa 1988.
- [3] Merksiz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych, tom I i II. Wyd. Politechniki Poznańskiej, 1999.
- [4] Adamczyk J.: Metaloznawstwo teoretyczne. Własności mechaniczne, Wyd. Politechniki Śląskiej, 1989.
- [5] Norma PN-EN 10098 - 1:2001. Stale i stopy zaworowe w silniku spalinowym.
- [6] Naumienko D., Singheiser L., Quadackers W.J.: Oxidation Limited of FeCrAl Based Alloys During Thermal Cycle, in Proceedings of an EFC Workshop, Frankfurt/Main 1999, pp. 287-306, ed. by M. Schultze and W.J. Quadackers.
- [7] Mrowec S., Weber T.: Korozja gazowa metali. Wydawnictwo Śląsk, 1976.
- [8] Mrowec S.: Kinetyka i mechanika utleniania stali. Wydawnictwo Śląsk, 1982.
- [9] Mrowec S., Werber T.: Modern Sc-Resistant Materials, National Bureau of Standards and National Science Foundation, Washington D.C., 1982.
- [10] Kofstad P.: High Temperature Corrosion, Elsevier Applied Science, London and New York, 1988, p.389.
- [11] Rahmel A.: Z. Elektrochem. 66, 363-371, 1961.
- [12] Wood G., Hobby M., Vaszko B.N.: J. Iron Steel Inst. 202, 685-691, 1964.

Mariusz Wisła, MSc. – research in the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr Mariusz Wisła – specjalista d/s Badań w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: mariusz.wisla@bosmal.com.pl



Krzysztof Adamaszek, DEng. – doctor in the Material Testing Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr inż. Krzysztof Adamaszek – adiunkt w Zakładzie Metaloznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: krzysztof.adamaszek@bosmal.com.pl



GC-MS/FID analysis of aldehyde and hydrocarbon emissions from exhaust gases of a spark ignition engine fueled with different ethanol-gasoline blends

In this paper the influence of changes in ethanol concentration in gasoline-alcohol blend on the concentrations of aldehydes and hydrocarbons emitted from a spark-ignition automotive engine is described. Results of the exhaust gas analysis with E0, E5, E10, E25 and E50 blends tested in a car meeting the Euro 5 emission standard are presented. It was found that an increase of the ethanol concentration in the fuel blend leads to an increase in the acetaldehyde concentration in the exhaust gas. TD-GC-FID/MS analysis of exhaust gases collected on two different, complementary sorbents (Carbograph 1TD, Tenax TA) allowed for identification of the large number of hydrocarbons.

Key words: gasoline-ethanol blends, aldehydes, hydrocarbons, exhaust gas analysis

Analiza emisji aldehydów i węglowodorów w spalinach silnika z zapłonem iskrowym zasilanego różnymi mieszankami benzyny z etanolem metodą GC-MS/FID

W artykule omówiono wpływ zmiany stężenia etanolu w mieszance benzyna-alkohol na zawartość aldehydów i węglowodorów w spalinach silników samochodowych o zapłonie iskrowym. Przedstawiono wyniki analiz spalin z mieszanek E0, E5, E10, E25 i E50 prowadzonych dla samochodu spełniającego wymagania dotyczące emisji Euro 5. Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem stężenia etanolu w mieszance paliwowej zwiększa się stężenie acetaldehydu w spalinach. Analiza z wykorzystaniem technik TD-GC-FID/MS spalin pobranych na dwa różne, uzupełniające się sorbenty (Carbograph 1TD, Tenax TA) pozwoliła na identyfikację dużej liczby węglowodorów.

Słowa kluczowe: mieszanki benzyna-etanol, aldehydy, węglowodory, analiza spalin

1. Introduction

Hundreds of organic and inorganic compounds, many of which have a negative influence on the environment and human health, are created during the combustion of fuel in the engine. These include, among others, oxides of nitrogen (NO_x), carbon monoxide (CO), and hydrocarbons (HC), including aromatic hydrocarbons and aldehydes. Aromatic hydrocarbons such as benzene and naphthalene are considered carcinogenic. Furthermore, carbonyl compounds such as formaldehyde, acetaldehyde, acrolein and methyl ethyl ketone (MEK) are classified as irritants, mutagens and / or carcinogens [1]. Emission standards (called the EURO standards 1 to 6) enforce measures to reduce their quantity and toxicity. The current (as of 1 September 2009), Euro 5 standard [2] specifies, for new cars with gasoline engines, the maximum CO emission at the level of 1000 mg/km, non-methane hydrocarbon emission of 68 mg/km, total hydrocarbon emissions of 100 mg/km, NO_x 60 mg/km (i.e. a 25% reduction compared with the Euro 4 standard), and particulate matter (for engines with direct injection) at 5 mg/km. From the introduction of the Euro 6 standard, planned for 2014, the requirements for emissions of pollutants from new cars will increase, including the introduction of a particle number emission limit for SI vehicles featuring direct injection engines. While the toxic nature of aldehyde emissions is widely recognized, no emissions limits are planned for the EU (currently, only the Californian legislation 'California Code of Regulations' covers aldehyde emissions). However,

1. Wstęp

Podczas spalania paliwa w silniku spalinowym powstaje kilkaset związków organicznych i nieorganicznych, z których wiele ma negatywny wpływ na środowisko i zdrowie człowieka. Można do nich zaliczyć między innymi tlenki azotu (NO_x), tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), w tym węglowodory aromatyczne i aldehydy. Węglowodory aromatyczne, takie jak np. benzen, naftalen uznawane są za rakotwórcze. Również związki karbonylowe, takie jak formaldehyd, acetaldehyd, acroleina, metyloetyloketon (MEK) zalicza się do drażniących, mutagennych i/lub rakotwórczych [1]. Standardy emisji spalin (określane jako normy Euro od 1 do 6) wymuszają działania mające na celu ograniczenie emisji związków szkodliwych spalin. Obecnie obowiązująca (od 1 września 2009 r.) norma Euro 5 [2] określa, dla nowych samochodów z silnikiem benzynowym, maksymalną emisję CO o wartości 1000 mg/km, węglowodorów niemetanowych 68 mg/km, całkowitej emisji węglowodorów 100 mg/km, NO_x 60 mg/km (co stanowi 25-procentową redukcję w porównaniu z normą Euro 4), a cząstek stałych (tylko dla samochodów z wtryskiem bezpośrednim benzyny) 5 mg/km.

Od roku 2014 planowane jest wprowadzenie normy Euro 6 zaostrzającej wymagania dotyczące emisji substancji szkodliwych przez nowe samochody, w tym wprowadzenie limitów emisji cząstek stałych przez samochody z silnikami o bezpośrednim wtrysku benzyny. Aldehydy, pomimo że jest znane ich toksyczne działanie, nie są objęte jeszcze limitami emisji w przepisach europejskich. Jedynie wymagania

ongoing research in the European Union and the United States define these compounds as expected to be regulated under future emissions regulations (e.g. Euro 7), along with other compounds, to reduce emissions of exhaust gases of internal combustion engines such as NO_2 , N_2O , NH_3 .

One of the potential ways to reduce emissions of harmful compounds in vehicle exhaust is the use of alternative fuels, or fuels with the addition of bio-components. Alcohols such as methanol (MeOH) and ethanol (EtOH) are added as oxidisers (low concentrations of alcohol) or alternative fuels (mixtures with high concentration of alcohol). Ethanol has more favourable properties than methanol as it exhibits greater stability and tolerance to water (lowering the risk of corrosion of fuel system components), and has much lower toxicity [3]. The results of emission testing of gasoline-alcohol blends have demonstrated that compared to "traditional" gasoline, increasing the concentration of alcohol in the blend leads to reductions in emissions of CO and hydrocarbons (including aromatics), whereas emissions of aldehydes increase [3 – 7]. NO_x emission is variable, but generally the addition of ethanol increases these emissions [4].

This study focuses primarily on determining the impact of increased ethanol content in the fuel on the emission of aldehydes, mainly acetaldehyde resulting from the incomplete oxidation of ethanol. The acetaldehyde content in the exhaust gas was determined as a derivative 2-hydroxymethylpiperidine (2-HMP) by GC-MS/FID gas chromatography.

Hydrocarbons present in the exhaust gas were also identified. Samples were collected by an active method on two different sorbents, Carbograph 1TD and Tenax TA, and then subjected to thermal desorption and analyzed using gas chromatography coupled with mass spectrometry.

2. Experimental

2.1. Samples

The exhaust gases analyzed resulted from combustion of gasoline-ethanol blends containing varying ethanol contents: 0%, 5%, 10%, 25% and 50% (by volume). The exhaust gases were generated by a passenger car with a spark ignition engine of cylinder displacement approximately 1.3 dm^3 , with 8 valves and a close-coupled TWC aftertreatment system, which fully met all requirements of the relevant Euro 5 standard. Tests were carried out in the exhaust emission laboratory at BOSMAL Automotive Research and Development Institute, described in [8] and shown in Figure 1, based on the New European Driving Cycle (NEDC) [9] (Fig. 2). This cycle is a commonly used driving cycle for quantifying emissions of harmful exhaust gas

kalifornijskie (*California Code of Regulation*) w USA określają obecnie limity emisji aldehydów. Jednak prowadzone obecnie prace badawcze w krajach Unii Europejskiej i USA określają te związki jako planowane do limitowania ich emisji w przyszłych przepisach Euro 7, obok innych związków do ograniczania w spalinach silników spalinowych, jak: NO_2 , N_2O , NH_3 .

Jednym z potencjalnych sposobów ograniczenia emisji związków szkodliwych spalin jest stosowanie paliw alternatywnych bądź paliw z dodatkiem biokomponentów. Alkohole, takie jak metanol (MeOH) i etanol (EtOH) dodawane są do paliwa jako dodatki utleniające (małe stężenie alkoholu) lub alternatywne paliwa (mieszanki o dużym stężeniu alkoholu). Etanol, z uwagi na lepszą stabilność i tolerancję wody, mniejsze ryzyko korozji elementów układu paliwowego i znacznie mniejszą toksyczność, ma lepsze właściwości od metanolu [3]. Badania emisji spalin z mieszanek benzyna-alkohol wskazują, że w porównaniu z tradycyjną benzyną na ogół ze wzrostem stężenia alkoholu w mieszance następuje zmniejszenie emisji CO i HC, w tym aromatycznych, natomiast zwiększa się emisja aldehydów [3 – 7]. Emisja NO_x jest zmienna, ale generalnie dodatek etanolu zwiększa ich emisję [4].

W badaniach przedstawionych w tej pracy skupiono się głównie na określeniu wpływu wzrostu zawartości etanolu w paliwie na emisję aldehydów, głównie acetaldehydu powstającego w wyniku niepełnego utlenienia etanolu. Zawartość acetaldehydu w spalinach oznaczano techniką chromatografii gazowej GC-MS/FID jako pochodną 2-hydroksymetylopiperidyny (2-HMP).

Podjęto również próbę identyfikacji węglowodorów obecnych w spalinach. Próbkę pobierano metodą aktywną



Fig. 1. Internal view of BOSMAL's climatic chamber, showing the windspeed fan and driver's aid mounted in front of a vehicle

Rys. 1. Komora klimatycznej laboratorium badania emisji w BOSMAL z wentylatorem chłodzącym samochód i monitorem z przebiegiem cyklu jezdowego, zamontowanym przed samochodem

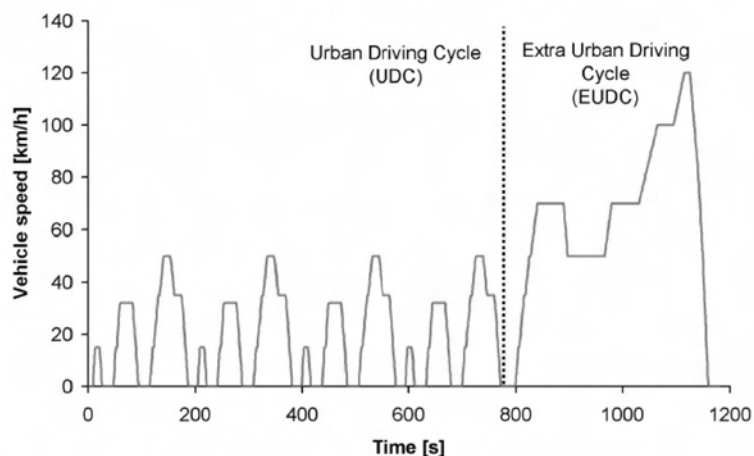


Fig. 2. New European Driving Cycle (NEDC)
Rys. 2. Nowy Europejski Cykl Jezdny (NEDC)

components on a chassis dynamometer, with a cold start and two phases: urban driving conditions (UDC), followed by extra-urban driving conditions (EUDC), covering a total distance of approximately 11 km.

Before the tests, the fuel blends were initially analyzed using the chromatography method in order to confirm the same gasoline base. Due to the fact that standard gasoline available at filling stations in the EU contains approximately 5% ethanol, E5 blend was used as the base fuel.

2.2. Sampling

The exhaust gases were collected by a pump (flow rate 6 dm³/min) into a Tedlar bag (of approximate volume 150 dm³), directly from the exhaust, over the entire driving cycle. During the test, 5547 dm³ of exhaust gases were generated, and the theoretical distance traveled by the vehicle was 11.007 km.

The exhaust gases were collected from the tedlar bag onto suitable sorbent tube. The parameters of the sampling are presented in Table 1.

In the case of sampling onto Tenax TA and 2-HMP tube, pre-filters with sodium thiosulfate Na₂S₂O₃ and potassium iodide KI were used. Their role is to reduce the negative impact of nitrogen oxides and ozone (both of which are present in the exhaust gas) on the sorbents.

2.3. Chromatography analysis

Chromatography analysis was performed with the use of an Agilent 7890 gas chromatograph (GC) with simultaneous detection (splitter) on the flame ionization detector (FID) and mass detector (MSD, Agilent 5975C) (Fig. 3).

na dwa różne sorbenty, Carbograph 1TD oraz Tenax TA, a następnie poddawano termodesorpcji i analizowano z wykorzystaniem techniki chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią masową.

2. Badania własne

2.1. Próbkki badawcze

Spaliny poddawane badaniom były produktem spalania mieszanek benzyna-etanol o różnej zawartości alkoholu: 0%, 5%, 10%, 25% i 50%. Spaliny pochodziły z samochodu osobowego z silnikiem ZI, o objętości skokowej około 1,3 dm³, 8-zaworowym, wyposażonym w reaktor katalityczny, spełniającego wymagania normy emisji Euro 5. Testy prowadzono w laboratorium badań emisji spalin Instytutu BOSMAL, opisanym w pracy [8] i przedstawionym na rys. 1, gdzie wykorzystano nowy europejski test jezdny (NEDC) [9] (rys. 2). Jest to powszechnie stosowany cykl

jezdny w badaniach emisji związków szkodliwych spalin, wykonywany na hamowni podwoziowej, cechujący się zimnym rozruchem oraz miejskimi i pozamiejskimi warunkami jazdy, o łącznym dystansie wynoszącym około 11 km.

Przed przystąpieniem do badań mieszanki paliw poddano wstępnej analizie chromatograficznej mającej na celu potwierdzenie jednakowej bazy benzynowej. Ponieważ tradycyjna benzyna dostępna na stacjach benzynowych zawiera około 5% etanolu, paliwo E5 potraktowano jako bazowe.

2.2. Pobór próbek

Spaliny pobierano za pomocą pompy (przepływ 6 dm³/min) do worka tedlarowego o pojemności około 150 dm³, bezpośrednio z układu wylotowego samochodu, w czasie trwania całego testu NEDC. Podczas testu generowane było 5547 dm³ spalin, a teoretyczna droga przebyta przez samochód wynosiła 11,007 km.

Z worka tedlarowego spaliny pobierano na odpowiednie rurki sorbentowe. Parametry poboru próbek przedstawiono w tabeli 1.

W sytuacji poboru próbek na rurki z Tenax TA oraz 2-HMP zastosowano filtry wstępne z tiosiarczanem sodu Na₂S₂O₃ i jodkiem potasu KI. Mają one zadanie ograniczenia negatywnego wpływu na sorbenty obecnych w spalinach tlenków azotu i ozonu.

2.3. Analiza chromatograficzna

Analizę chromatograficzną prowadzono z wykorzystaniem chromatografu gazowego Agilent 7890A (GC) z

Table 1. Parameters of exhaust gas sampling

Tabela 1. Parametry poboru próbek spalin

Compound group/grupa związków	Sorbent/sorbent	Flow rate/przepływ [ml/min]	Sample volume/objętość próbki [dm ³]
Aromatic and aliphatic hydrocarbons/ węglowodory aromatyczne i alifatyczne	Carbograph 1TD/carbograph 1TD	100	1
	Tenax TA/Tenax TA	100	1
Aldehydes/aldehydy	2-hydroxymethylpiperidine (2-HMP) on XAD-2 resin/ 2-hydroksymetylopiperydyna (2-HMP) na złożu XAD-2	100	3



Fig. 3. Chromatography system: GC Agilent 7890A with autosampler 7683B, splitter and FID detector, MSD Agilent 5975C mass selective detector, Agilent G1888 headspace sampler, Markes UNITY2 thermodesorber and Markes μ -CTE (Micro-Chamber Thermal Extractor), situated within BOSMAL's chemical laboratory

Rys. 3. Zestaw chromatograficzny: GC Agilent 7890A z podajnikiem 7683B, dzielnikiem strumienia gazu i detektorem FID, MSD Agilent 5975C, próbnikiem headspace Agilent G1888, termodesorberem Markes UNITY2 i mikrokomorą Markes μ -CTE (Micro-Chamber Thermal Extractor) w laboratorium chemicznym w BOSMAL

jednoczesną detekcją (dzielnik strumienia gazu) detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (FID) i masowym (MSD, Agilent 5975C) (rys. 3).

W analizie węglowodorów rurki sorbentowe poddawano desorpcji termicznej (termodesorber Markes UNITY2, pułapka wymrażająca U-T11GPC-2S general purpose carbon (C4/5-C30/32)) przez 15 min w temperaturze 300 °C, a następnie wprowadzano na kolumnę chromatograficzną ze splitem 30:1. Rurki sorbentowe do analiz aldehydów poddawano ekstrakcji 1 ml toluenu (z dodatkiem dimetyloformamidu (DMF) jako wzorca wewnętrznego, 20 μ l DMF/100 ml toluenu) w łaźni ultradźwiękowej przez 30 min. Warunki analizy chromatograficznych przedstawiono w tabeli 2.

Identyfikację związków prowadzono, opierając się na chromatogramie uzyskanym z detektora masowego.

Table 2. Parameters of chromatography analysis

Tabela 2. Warunki analizy chromatograficznej

Parameter/parametr	Analysis parameters/warunki analizy		
	gasoline-ethanol blend/paliwo benzyna-etanol	exhaust gases/spaliny	
		Hydrocarbons/węglowodory	Aldehydes/aldehydy
Chromatography column/ kolumna chromatograficzna	DB-5ms UI (Agilent); 60 m \times 320 μ m \times 1 μ m	DB-5ms UI (Agilent); 60 m \times 320 μ m \times 1 μ m	DB-1301 (Agilent); 30 m \times 320 μ m \times 1 μ m
Injector/dozownik	injection 1 μ l, split 200:1, t = 300 °C, carrier gas He, constant flow 2,5 ml/min/nastrzyk 1 μ L, podział 200:1, t = 300 °C, gaz nośny He, stały przepływ 2,5 ml/min	splitless mode, t = 300 °C, carrier gas He, constant pressure 23 psi/ tryb bez podziału, t = 300 °C, gaz nośny He, stałe ciśnienie 23 psi	splitless mode, t = 250 °C, carrier gas He, constant flow 2 ml/min/tryb bez podziału, t = 250 °C, gaz nośny He, stały przepływ 2 ml/min
Temperature program/ program temperaturowy	40 °C (2 min); 3 °C/min, 92 °C; 5 °C/min, 160 °C; 10 °C/min, 290 °C (12 min)	40 °C (2 min); 3 °C/min, 92 °C; 5 °C/min, 160 °C; 10 °C/min, 290 °C (12 min)	80 °C (1 min); 10 °C/min, 100 °C (3 min); 30 °C/min, 260 °C (5 min)
Detector: FID MSD/ Detektor: FID MSD	t = 350 °C, SCAN mode, mass range 29 – 350 [u]/t = 350 °C tryb SCAN, zakres mas 29 – 350 [u]	t = 350 °C SCAN mode, mass range 29 – 260 [u]/t = 350 °C tryb SCAN, zakres mas 29 – 260 [u]	t = 280 °C, SCAN mode, mass range 35 – 400 [u]/t = 280 °C tryb SCAN, zakres mas 35 – 400 [u]

In the case of hydrocarbon analysis, the sorbent tubes were subjected to thermal desorption (Markes UNITY2 thermodesorber, cold trap U-T11GPC-2S general purpose carbon (C4/5-C30/32)) for 15 min at a temperature of 300 °C, followed by injection onto a chromatography column with a 30:1 split.

The sorbent tubes for aldehyde analysis were extracted using 1 ml of toluene (with the addition of dimethylformamide (DMF) as an internal standard, 20 μ l DMF/100 ml toluene), in ultrasonic bath for 30 min. The parameters of the chromatography analysis are presented in Table 2.

The identification of compounds was performed based on the chromatogram obtained from the mass detector. The mass spectra of compounds were compared with NIST08 base spectra using the PBM algorithm (probability-based

Widma masowe związków porównywano z bazą widm NIST08, stosując algorytm PBM (*probability-based matching*). Związki z dopasowaniem powyżej 80% uznano za zidentyfikowane.

Analizę ilościową aldehydów przeprowadzono na podstawie wyników uzyskanych z detektora FID na podstawie krzywych wzorcowych poszczególnych związków.

3. Analiza wyników badań

3.1. Paliwa badawcze

Zgodnie ze świadectwem jakości mieszanek badawczych benzyna-etanol zawartość etanolu wynosiła odpowiednio: E0 < 0,1%; E5 = 5,0%; E10 = 10,8%; E25 = 26,4%; E50 = 49,8 % (v/v). Porównawcza analiza chromatograficzna

matching). Compounds with an 80% match (or better) were recognized as positively identified. Quantitative analysis of the aldehydes was conducted on the basis of results obtained from the FID detector, based on the calibration curves of individual compounds.

3. Results and discussion

3.1. Fuels

In accordance with the certificate for the gasoline-ethanol blends, the content of alcohol is, respectively: E0 < 0.1%, E5 = 5.0%, E10 = 10.8%, E25 = 26.4%, E50 = 49.8% (v/v). Comparative chromatographic analysis showed that there were no significant differences in the qualitative composition of the fuel blend. With the increase of ethanol concentration in the blend, compounds from gasoline decrease. A sample comparison of chromatograms for the E10 and E50 blends is shown in Fig. 4.

3.2 Hydrocarbon analysis

The main aim of the analysis was identification of hydrocarbons present in the exhaust gas. For this purpose, the exhaust gas was collected onto two different, complementary sorbents: Carbograph 1TD and Tenax TA. Carbograph 1TD belongs to the group of carbon sorbents, with a medium bond strength, and is used to analyze a wide range of volatile organic compounds. It is hydrophobic and does not demonstrate a tendency to create artifacts (i.e.

wykazała, że nie występują istotne różnice w składzie jakościowym mieszanki paliwowej. Ze wzrostem stężenia etanolu w mieszance maleje udział związków pochodzących z benzyny. Przykładowy fragment chromatogramów paliwa E10 i E50 przedstawiono na rys. 4.

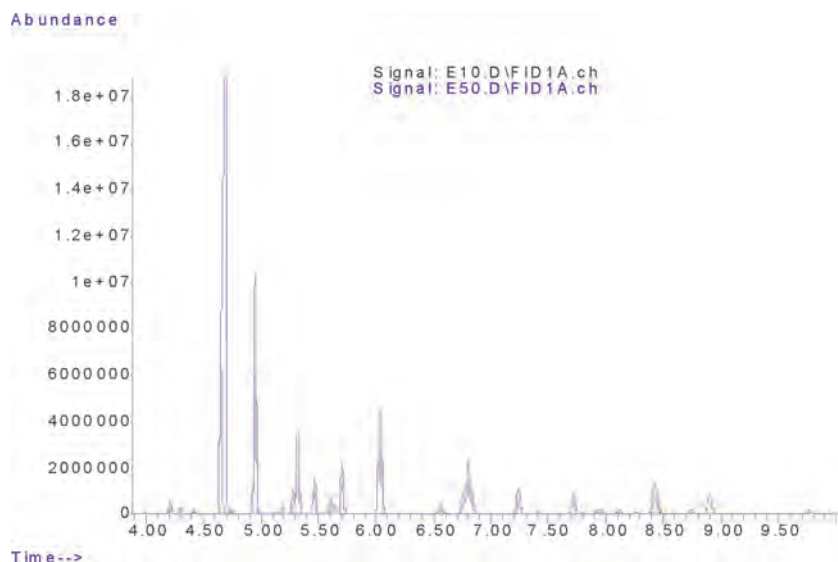


Fig. 4. Sample comparison of chromatograms for the E10 and E50 fuel blends; peak at retention time 4.70 min corresponds to the ethanol

Rys. 4. Fragmenty chromatogramów paliwa E10 i E50; pik przy czasie retencji 4,70 min odpowiada etanolowi

3.2. Analiza węglowodorów

Analiza węglowodorów obecnych w spalinach koncentrowała się na ich identyfikacji. W tym celu próbki spalin pobierano na dwa różne, uzupełniające się sorbenty: Carbograph 1TD oraz Tenax TA.

Carbograph 1TD należy do grupy sorbentów węglowych o średniej sile wiązania; używany jest do analizy szerokiego zakresu lotnych związków organicznych. Jest hydrofobowy i nie wykazuje skłonności do tworzenia artefaktów, czyli fałszywych pików (zakłóceń) na chromatogramach. Tenax TA jest hydrofobowym sorbentem polimerowym. Wykazuje skłonność do tworzenia artefaktów w kontakcie m.in. z ozonem, tlenkami azotu i innymi związkami utleniającymi obecnymi w próbce [10, 11]. Z tego względu przed złożeniem Tenax TA zastosowano filtry wstępne z tiosiarczanu sodu $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ oraz z jodku potasu KI. Analogicznie postępowano w przypadku poboru próbek na 2-HMP.

Przeprowadzone analizy spalin potwierdziły, że sorbenty uzupełniają się. Można zauważyć, że na sorbencie Carbograph 1TD lepiej niż na Tenax TA zatrzymywane są bardziej lotne związki organiczne (o czasie retencji do około 25 min). Tenax TA zatrzymuje związki o wyższych temperaturach wrzenia, przez co

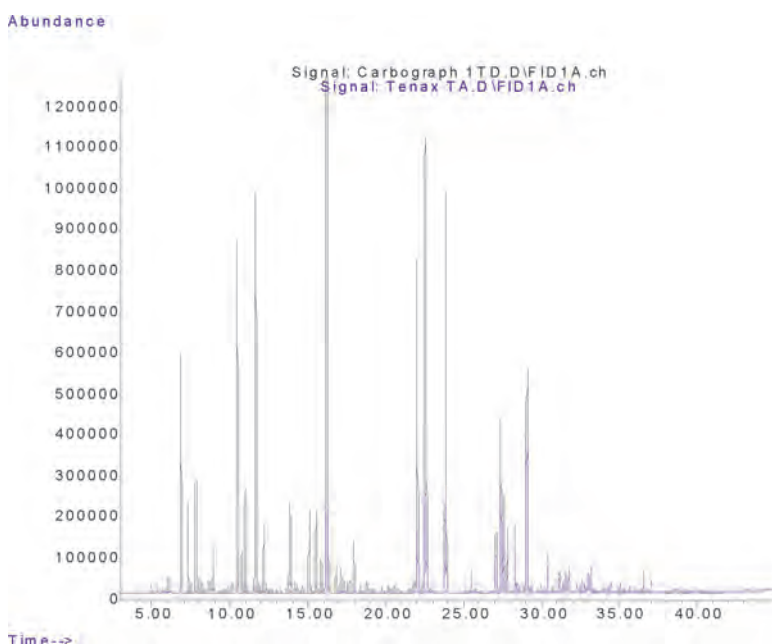


Fig. 5. Sample chromatograms of exhaust gases from the E0 fuel collected onto Carbograph 1TD and Tenax TA sorbents

Rys. 5. Przykładowe chromatogramy spalin z paliwa E0 pobrane na sorbenty Carbograph 1TD i Tenax TA

false peaks (disturbances) on the chromatograms). Tenax TA is a hydrophobic polymer sorbent. It tends to create artifacts in contact with ozone, nitrogen oxides and other oxidizing compounds present in the sample [10, 11]. Therefore, before the Tenax TA bed, pre-filters with $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ sodium thiosulfate and potassium iodide KI were used. An analogous procedure was undertaken while sampling onto 2-HMP.

umożliwia dokładniejszą ich identyfikację. Przykładowe chromatogramy spalin z paliwa E0 przedstawiono na rys. 5.

W wyniku analiz spalin z mieszanek benzyna-etanol pobieranych na powyższe sorbenty stwierdzono obecność około 250 związków, z których zidentyfikowano 126. Związki te podzielono na trzy podstawowe grupy, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Table 3. Hydrocarbons identified in the exhaust gas
Tabela 3. Podział węglowodorów zidentyfikowanych w spalinach

	Hydrocarbons identified in the exhaust gas/węglowodory zidentyfikowane w spalinach		
	Aliphatic/alifatyczne		Aromatic/aromatyczne
	Chains/łańcuchowe	Cyclic/cykliczne	
Number of identified hydrocarbons/ liczba zidentyfikowanych węglowodorów	42	35	49

It can be seen that more volatile organic compounds (retention time up to 25 min.) are retained on the Carborgraph 1TD sorbent, better than on Tenax TA (Fig. 5). Tenax TA retains compounds with higher boiling points, which enables more precise identification. Sample chromatograms with E0 fuel are shown in Figure 5.

As a result of the analysis of exhaust gas from the combustion gasoline-ethanol blends collected on the sorbents, about 250 compounds were found, of which 126 were identified. Those compounds were divided into three basic groups. The results are presented in Table 3.

Straight chain hydrocarbons C5–C10 and their branched derivatives were mainly identified among chain aliphatic hydrocarbons. The cyclic hydrocarbons identified are derivatives of cyclopropane, cyclopentane and cyclohexane.

A large group of compounds present in the exhaust gases were aromatic hydrocarbons. Compounds hazardous to human health and the environment were identified, including benzene, toluene, ethylbenzene, ethyltoluene, xylenes, styrene, cumene, as well as benzene derivatives (containing both straight and branched hydrocarbon chains as ligands).

Both aliphatic and aromatic hydrocarbons present in the exhaust gases can come from incompletely combusted fuel and result from complex reactions occurring in the engine's combustion chamber.

Ethanol present in the fuel blend is not completely burned during the combustion process in the engine, as evidenced by its presence in the exhaust gas. The products of incomplete oxidation of ethanol are acetaldehyde and acetic acid, which were also found in the exhaust gas.

3.3. Aldehyde analysis

During the collection of exhaust gases onto sorbent bed with 2-HMP, reactions leading to the formation of aldehyde derivatives occur, thus enabling analysis by gas chromatography. A schematic reaction of aldehydes with 2-HMP is shown in Fig. 6 [12, 13]

Wśród łańcuchowych węglowodorów alifatycznych zidentyfikowano głównie proste węglowodory C5–C10 oraz ich rozgałęzione pochodne. Zidentyfikowane węglowodory cykliczne to pochodne cyklopropanu, cyklopentanu, cykloheksanu.

Dużą grupę związków obecnych w spalinach stanowią węglowodory aromatyczne. Zidentyfikowano związki niebezpieczne dla środowiska i zdrowia człowieka, takie jak benzen, toluen, etylobenzen, etylotoluen, ksyleny, styren, kumen, a także pochodne benzenu (zawierające jako podstawniki proste i rozgałęzione łańcuchy węglowodorowe).

Węglowodory zarówno alifatyczne, jak i aromatyczne obecne w spalinach mogą pochodzić z niecałkowicie spalonego paliwa oraz powstawać w wyniku złożonych reakcji zachodzących w komorze spalania silnika. Etanol obecny w paliwie nie jest całkowicie spalany w komorze silnika, o czym świadczy jego obecność w spalinach. Produktami niecałkowitego utleniania etanolu są obecne w spalinach acetaldehyd oraz kwas octowy.

3.3. Analiza aldehydów

Podczas poboru próbki na złożu z 2-HMP zachodzą reakcje prowadzące do powstawania pochodnych aldehydów, przez co możliwa jest ich analiza z wykorzystaniem chromatografii gazowej. Schematyczną reakcją powstawania pochodnych aldehydów z 2-HMP przedstawiono na rys. 6 [12, 13].

Przed rurką z sorbentem zastosowano filtry wstępne: jeden z tiosiarczanu sodu $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, drugi z jodku potasu KI. Filtry mają za zadanie ograniczenie niekorzystnego wpływu tlenków azotu i ozonu obecnego w spalinach na sorbent. Gazy te powodują m.in. degradację złoża sorbentu, ponadto obecność ozonu obniża trwałości pochodnych aldehydów, co skutkuje zaniżaniem wyników analiz.

W trakcie analiz ślepej próby na sorbencie 2-HMP stwierdzono obecność acetaldehydu i formaldehydu, co uwzględniono na etapie przygotowania metody analitycznej.

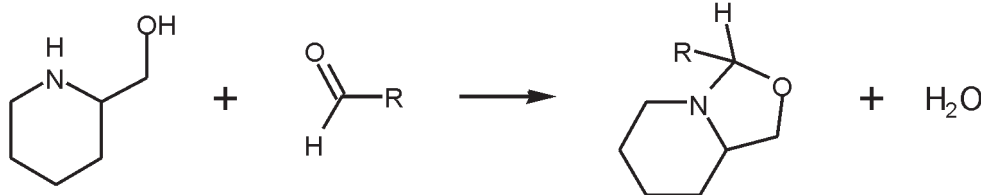


Fig. 6. Schematic reaction of aldehydes with 2-HMP
 Rys. 6. Schemat reakcji 2-HMP z aldehydami

Pre-filters, with sodium thiosulfate $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ and potassium iodide KI, were applied in front of the sorbent tube. Filters were used to reduce the negative effect of nitrogen oxides and ozone in the exhaust gases to the sorbent. These gases cause, among other effects, degradation of the sorbent bed. Moreover, the presence of ozone reduces the stability of aldehyde derivatives, leading to underestimation of the derivative concentration. During the analysis of a blank test of 2-HMP, acetaldehyde and formaldehyde were found, which was considered in the analytical method.

Analysis of exhaust gases revealed the presence of acetaldehyde and trace amounts of formaldehyde and ben-

Analiza spalin wykazała obecność acetaldehydu oraz śladowych ilości formaldehydu i benzaldehydu, niepozwalających na ich oznaczenie ilościowe. Stosując opisaną metodę analityczną, nie stwierdzono obecności innych aldehydów. Może to być spowodowane ograniczeniami metody lub małymi stężeniami tych aldehydów w spalinach z mieszanek benzyna-etanol.

Zawartość acetaldehydu w spalinach pozwala na jego oznaczenie ilościowe. W tabeli 4 przedstawiono zawartość acetaldehydu w spalinach w zależności od stężenia etanolu w paliwie. Wynik analizy chromatograficznej został przeliczony na emisję spalin ($5,574 \text{ m}^3$) wyrażoną w m^3 oraz na teoretyczną drogę przebytą przez samochód w teście ($11,007 \text{ km}$) wyrażoną w km . Zależność stężenia acetaldehydu w spalinach od stężenia etanolu w paliwie wraz z zakresem błędów RSD przedstawiono graficznie na rys. 7.

Table 4. Acetaldehyde emission as a function of the concentration of ethanol in the blend

Tabela 4. Emisja acetaldehydu w spalinach w zależności od stężenia etanolu w paliwie

Fuel/paliwo	EtOH content [%]/ zawartość EtOH [%]	concentration of acetaldehyde in exhaust gases/stężenie acetalde- hydu w spalinach	acetaldehyde road emis- sion/emisja drogowa acetaldehydu	RSD [%]
		[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	[$\mu\text{g}/\text{km}$]	
E0	< 0.1	2.10	0.57	9.79
E5	5.0	4.81	1.31	2.88
E10	10.8	9.35	2.55	3.13
E25	26.4	15.07	4.11	4.85
E50	49.8	21.84	5.95	1.09

RSD [%] relative standard deviation (based on three measurements)/RSD [%] względne odchylenie standardowe (z trzech pomiarów)

zaldehyde, which did not permit their quantification. Using the method of analysis described, other aldehydes were not detected. This may be due to the limitations of the method or low concentrations of these aldehydes in the exhaust gases generated from gasoline-ethanol blends.

The content of acetaldehyde in the exhaust gas permits its quantification. Table 4 shows the acetaldehyde content in the exhaust gas depending on the concentration of ethanol in the fuel. The result of chromatographic analysis has been recalculated, based on total exhaust emissions (5.574 m^3), expressed in m^3 , and the theoretical distance traveled by the car during the test (11.007 km), expressed in km .

Dependence of concentration of acetaldehyde on ethanol content in the fuel blends with RSD error are shown graphically in Figure 7.

Based on these data, it was found that the concentration of acetaldehyde in the exhaust gas depends largely on the ethanol content in the fuel blend. Increasing the concentration of ethanol from 5% (base fuel) to 10% resulted in twice the

Na podstawie powyższych danych można stwierdzić, że stężenie acetaldehydu w spalinach zależy w dużym stopniu od zawartości etanolu w mieszance paliwowej. Wzrost stężenia etanolu z 5% (paliwo bazowe) do 10% spowodował dwukrotnie wyższą emisję acetaldehydu. Dalsze zwiększanie zawartości etanolu w paliwie nie powoduje tak gwałtownego przyrostu stężenia tego aldehydu w spalinach. W porównaniu do E5, spaliny z E25 zawierają nieco ponad 3-krotnie więcej, a z E50 około 4,5-krotnie więcej acetaldehydu.

Obecność acetaldehydu w spalinach z E0 potwierdza, że nie powstaje on tylko na skutek niecałkowitego utleniania etanolu, ale jest również produktem procesów spalania węglowodorów obecnych w benzynie.

Wartość względnego odchylenia standardowego (RSD), które za wyjątkiem paliwa E0 wynosi poniżej 5%, wskazuje na dobrą powtarzalność analiz, potwierdzając dobrą jakość metody analitycznej wykorzystywanej w badaniach. Dla paliwa E0 większa wartość RSD może

emissions of acetaldehyde. However, further increases of the ethanol content in the fuel does not cause such a rapid increase in the concentration of the aldehyde in the exhaust. Compared to E5, E25 exhaust gases contain just over 3 times more acetaldehyde, and in case of E50 about 4.5 times more.

The presence of acetaldehyde in the exhaust gases from E0 confirms that it is not only formed due to incomplete oxidation of ethanol, but is also a product of combustion of hydrocarbons present in gasoline.

The value of relative standard deviation (RSD), which except for the E0 fuel, less than 5%, indicating good reproducibility of the analysis, confirming the quality of the analytical method used in the study. In the case of E0 fuel, the higher RSD value may be due to the relatively low content of acetaldehyde in the exhaust gases.

The low content of formaldehyde detected in the exhaust gas may be a result of imperfections in the method – intermediate stage of sampling into the Tedlar bag. This intermediate stage of sampling can lead to an aldehyde concentration decrease, due to the high reactivity of carbonyl compounds.

Probably the modification of sampling stages, skipping the Tedlar bag collection step, and sampling the exhaust gas directly from the tailpipe onto the sorbent, could allow detection of large amounts of formaldehyde and/or other aldehydes. Despite its limitations, the method has proved useful for the determination of acetaldehyde in the exhaust gases.

4. Conclusions

Application of thermal desorption and gas chromatography analysis GC/MS allows the identification of a large number of hydrocarbons present in the exhaust gases generated from gasoline-ethanol blends. Using the sampling of different, complementary sorbents, such as Carbograph 1TD and Tenax TA, allows for more exact identification of the large number of compounds. Nearly half of the identified hydrocarbons are aromatic compounds, hazardous to health, including benzene, toluene, xylenes, styrene and ethylbenzene, among others.

Sampling of exhaust gas on a bed of XAD-2 coated with 2-HMP and followed by GC-MS/FID analysis revealed the presence of acetaldehyde, and trace amounts of formaldehyde and benzaldehyde. The amount of acetaldehyde permitted quantitative analysis.

It was found that an increase of ethanol concentration in the fuel blend lead to an increase in acetaldehyde concen-

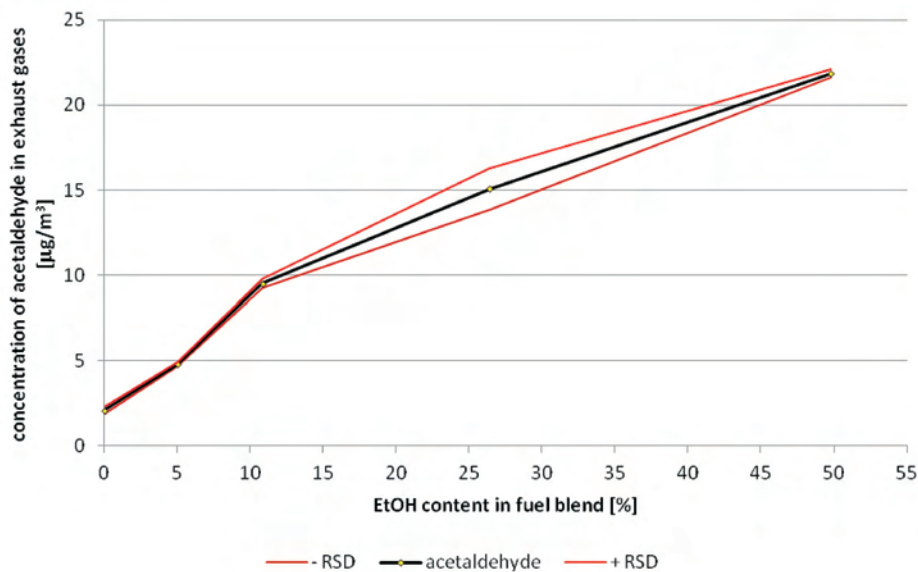


Fig. 7. The dependence of concentration of acetaldehyde on ethanol content in the fuel blends with RSD error

Rys. 7. Zależność stężenia acetaldehydu od stężenia etanolu w paliwie

być wynikiem niewielkiej zawartości acetaldehydu w spalinach.

Mała zawartość formaldehydu w spalinach, uniemożliwiająca oznaczenie ilościowe, może świadczyć o niedoskonałości metody – pośredni etap poboru do worka Tedlar. Etap pośredni poboru może prowadzić do zmniejszenia stężenia aldehydów ze względu na dużą reaktywność związków karbonylowych.

Prawdopodobnie modyfikacja etapu poboru próbek (pominięcie etapu poboru do worka Tedlar, pobór bezpośrednio z rury wylotowej na sorbent) mogłaby pozwolić na analizę ilościową emisji formaldehydu i ewentualnie innych aldehydów. Pomimo swoich ograniczeń metoda okazała się użyteczna do oznaczania zawartości acetaldehydu w spalinach.

4. Wnioski

Zastosowanie techniki termodesorpcji i analizy chromatograficznej GC/MS pozwala na identyfikację bardzo dużej liczby węglowodorów obecnych w spalinach generowanych z mieszanek benzyna-etanol. Wykorzystanie do poboru spalin odmiennych, uzupełniających się sorbentów, jakimi są Carbograph 1TD i Tenax TA, pozwala na dokładniejszą identyfikację większej liczby związków. Ze zidentyfikowanych węglowodorów prawie połowa to niebezpieczne dla zdrowia związki aromatyczne, m. in. benzen, toluen, ksyleny, styren, etylobenzen.

Pobór próbek spalin na złożo XAD-2 pokryte 2-HMP, a następnie analiza GC-MS/FID wykazały obecność acetaldehydu oraz śladowych ilości formaldehydu i benzaldehydu. Zawartość acetaldehydu pozwoliła na jego analizę ilościową. Stwierdzono, że ze wzrostem stężenia etanolu w mieszance paliwowej wzrasta stężenia acetaldehydu w spalinach. Wzrost stężenia etanolu z 5% (paliwo bazowe) do 10% powoduje dwukrotny wzrost stężenia acetaldehy-

tration in the exhaust gas. Increasing the concentration of ethanol from 5% (base fuel) to 10% will double the emission of acetaldehyde. In the case of the 50% ethanol blend, emission of acetaldehyde is 4.5 times greater than in case of the base (5% ethanol) fuel blend.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support of the Polish Ministry of Science and Higher Education (Project N N509 494 838) funds for years 2010-2012.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

du. W odniesieniu do mieszanki zawierającej 50% etanolu emisja acetaldehydu jest 4,5-krotnie większa niż dla paliwa bazowego (mieszanki zawierającej 5% etanolu).

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Projekt N N509 494838) w latach 2010-2012.

Bibliography/Literatura

- [1] Pang X., Shi X., Mu Y., He H., Shuai S., Chen H., Li, R.: Characteristics of carbonyl compounds emission from a diesel-engine using biodiesel-ethanol-diesel as fuel. *Atmospheric Environment*, 40, 7057-7065, 2006.
- [2] Commission Regulation (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. *Official Journal of the European Union*, L199, 1-136, 28.7.2008.
- [3] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J.: A Study of Gasoline-Ethanol Blends Influence on Performance and Exhaust Emission from a Light-Duty Gasoline Engine, SAE Technical Paper 2012-01-1052.
- [4] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J.: The Effect of Various Petrol-Ethanol Blends on Exhaust Emission and Fuel Consumption of an Unmodified Light-Duty SI Vehicle, SAE Technical Paper 2011-24-0177.
- [5] Magnusson R., Nilsson C.: The influence of oxygenated fuels on emissions of aldehydes and ketones from a two-stroke spark ignition engine. *Fuel*, Vol. 90, 1145-1154, 2011.
- [6] Lemaire R., Therssen E., Desgroux P.: Effect of ethanol addition in gasoline and gasoline-surrogate on soot formation in turbulent spray flames. *Fuel*, Vol. 89, Issue 12, 3952-3959, 2010.
- [7] Jia L.W., Shen M.Q., Wang J., Lin M.Q.: Influence of ethanol-gasoline blended fuel on emission characteristics from a four-stroke motorcycle engine. *Journal of Hazardous Materials*, A123, 29-34, 2005.
- [8] Bielaczyc P., Pajdowski P., Szczotka A., Woodburn J.: Development of vehicle exhaust emission testing methods – BOSMAL's new emission testing laboratory. *PTNSS-2011-SS1-101, Combustion Engines*, 1/2011.
- [9] Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998. 1998L0069, 1998.
- [10] Clausen P.A., Wolkoff P.: Degradation products of Tenax TA formed during sampling and thermal desorption analysis: indicators of reactive species indoors. *Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 5, 715-725, 1997.
- [11] Lee J.H., Batterman S.A., Jia, C., Chernyak S.: Ozone Artifacts and Carbonyl Measurements Using Tenax GR, Tenax TA, Carbopack B, and Carbopack X Adsorbents, *Journal Air & Waste Manage. Assoc.*, Vol. 56, 1503-1517, 2006.
- [12] NIOSH Manual of Analytical Methods, Methods 2501, Issue 2, 15 August 1994.
- [13] NIOSH Manual of Analytical Methods, Methods 2539, Issue 2, 15 August 1994.

Piotr Bielaczyc, DEng. – head of the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Piotr Bielaczyc – kierownik Zakładu Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.bielaczyc@bosmal.com.pl



Damian Łomankiewicz, MSc. – chemical laboratory manager, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Mgr Damian Łomankiewicz – kierownik Pracowni Chemicznej, Zakład Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: damian.lomankiewicz@bosmal.com.pl



Krzysztof Brodzik, DEng. – research-technical specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Krzysztof Brodzik – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: krzysztof.brodzik@bosmal.com.pl



Investigation of volatile organic compounds in the cabin air of new cars

Potential human health effects of material emissions in new car cabins are of great public concern. In present work, four new cars with different equipment were tested to assess the nature of volatile organic compounds (VOCs) associated with new vehicle interior. Air samples were collected on solid sorbents and analyzed using thermal desorption and GC-MS/FID. Different types of sorbents were applied to effectively adsorb VOCs. The maximal number of VOCs, trapped from the in-vehicle air, was identified and compounds occurring in air from cabins of all examined vehicles were selected and classified. VOCs emission from identified compounds was calculated and potential sources of identified VOCs were discussed. For aromatic hydrocarbons, the comparison of individual VOCs concentrations was performed.

Key words: VOC, new car, vehicles interior, indoor air pollution

Badanie lotnych związków organicznych występujących w powietrzu z wnętrza kabin nowych samochodów

Potencjalny wpływ na ludzkie zdrowie wywierany przez emisję związków z materiałów występujących w kabinach nowych samochodów jest tematem wywołującym wiele emocji. W niniejszej pracy zbadano cztery nowe samochody z różnym wyposażeniem w celu określenia charakteru lotnych związków organicznych (LZO) pochodzących z wnętrza nowych pojazdów. Próbki powietrza pobierano na adsorbenty stałe i analizowano z wykorzystaniem techniki desorpcji termicznej sprzężonej z GC-MS/FID. Zastosowano różne typy adsorbentów celem efektywnej adsorpcji LZO. Zidentyfikowano maksymalną liczbę LZO pobranych z powietrza wewnątrz samochodu, a także wyodrębniono i sklasyfikowano związki występujące w kabinach wszystkich badanych pojazdów. Wyznaczono emisję pochodzącą od zidentyfikowanych LZO oraz przeprowadzono dyskusję potencjalnych źródeł pochodzenia zidentyfikowanych związków. Dla węglowodorów aromatycznych porównano stężenia poszczególnych zidentyfikowanych związków.

Słowa kluczowe: LZO, nowy samochód, wnętrze pojazdu, zanieczyszczenie powietrza wewnętrznego

1. Introduction

In recent years, greatly increased attention has been focused on the quality of indoor air. In the modern motorized society, people spend appreciable amount of time in automobiles, which present a unique indoor environment, therefore the air quality in car-cabin should be drawing attention from the same standpoints as on the indoor air quality in buildings and houses. Passengers travelling in vehicles are exposed to variety of organic pollutants, which may have significant effects on their health and comfort. Additionally, airborne pollutants in new car cabins are responsible for a "new car odor". To many, this odor is considered to be pleasant, but to some car users may be a strong nuisance and at high concentration may evoke sensory irritation.

According to the World Health Organization (WHO) [1], organic indoor pollutants, sampled by adsorption onto solid sorbents, have been classified into four groups concerning their boiling-point ranges: very volatile organic compounds (VVOC) with a boiling point range from 0 °C to 50 – 100 °C, volatile organic compounds (VOC): 50 – 100 °C to 240 – 260 °C, semivolatile organic compounds (SVOC): 240 – 260 °C to 380 – 400 °C and organic compounds associated with particulate matter or particulate organic matter (POM): > 380 °C. The other divisions can be made according to

1. Wprowadzenie

Obecnie szczególnie dużą uwagę skupia się na jakości powietrza wewnętrznego. W nowoczesnym społeczeństwie zmotoryzowanym ludzie spędzają znaczną ilość czasu w samochodach, będących szczególnym przypadkiem środowiska wewnętrznego, co powoduje, że jakość powietrza w kabinach samochodowych powinna stać się przedmiotem zainteresowania na równi z jakością powietrza wewnątrz budynków i domów mieszkalnych. Pasażerowie podróżujący samochodami narażeni są na różnego typu zanieczyszczenia organiczne, mogące mieć znaczący wpływ na ich zdrowie i komfort podróżowania. Dodatkowo zanieczyszczenia występujące w kabinach nowych samochodów odpowiedzialne są za tak zwany zapach nowego samochodu. Przez wiele osób zapach ten odczuwany jest jako przyjemny, ale dla niektórych użytkowników samochodów może być bardzo uciążliwy, a przy wysokich stężeniach wręcz wywoływać podrażnienie narządów zmysłów.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) [1], organiczne zanieczyszczenia wewnętrzne, pobierane drogą adsorpcji na sorbentach stałych, zostały podzielone na cztery grupy ze względu na ich temperatury wrzenia: bardzo lotne związki organiczne (VVOC) z zakresem temperatur wrzenia od 0 °C do 50 – 100 °C, lotne związki organiczne (VOC): 50 – 100 °C do 240 – 260 °C, średniolotne związki

the chemical character of organic chemicals (alkanes, aromatic hydrocarbons, aldehydes, alcohols, etc.) or their potential health effect (irritants, neurotoxics, carcinogens, etc.) [2].

Odor in a new car cabin is caused by a complex mixture of various compounds emitted from interior parts and materials. VOCs associated with in-vehicle trim material emissions include the emission from sealants, carpets, plastic molding, adhesives, paints, leather and foam cushions. Other sources of interior vehicle VOCs might be cleaning substances, deodorisers, refreshers or lubricants, tobacco smoke and even microbial VOC emission [3, 4, 5, 6, 7]. The car cabin interior is very specific environment, due to the much higher than in average room ratio of the volume of interior materials to the indoor space. Furthermore, during summer, the temperature inside cabin easily arises, resulting in increased VOCs diffusion and much higher concentrations of chemicals than in residences. Depending on the component, humidity may also greatly affect the diffusion of VOCs. Generally, the diffusion behaviours of interior trim material VOCs could be classified into two types. The first one is associated with solvents used for paint materials and adhesives. Those compounds vaporize rapidly and are called vaporization rate controlled components. The second type can be found in additives and unreacted components. In case of those compounds, called diffusion rate controlled components, the diffusion process takes place in the extended period of time [7, 8].

Information about the type and concentration of chemical compounds diffusing from interior vehicle materials is extremely important for evaluating the health effects of human exposure, however little is known about this type of indoor air pollution in car cabins. Brown and Cheng [9] indicated that the main pollutants found in the new cars were benzene, acetone, ethylbenzene, xylene isomers, toluene and hydrocarbons. Most of them are toxic and are potential sources of health hazards, for example xylenes are fetal development toxic agents, acetone is a mucosal irritant, benzene is a known human carcinogen, while ethylbenzene is classified as potential human carcinogens by the International Agency for Research and Cancer [10]. Grabbs et al. [4] found over 60 VOCs inside the interiors of the four new vehicles, with total VOC concentrations generally exceeding those in ambient air and highly variable between examined cars. Only four compounds were identified in all vehicles: toluene, ethylbenzene, xylenes and undecane. Overton and Manura [11] investigated one new car to determine the presence and changes of VOCs over time. More than 100 of VOCs were identified with many straight and branched chain hydrocarbons, siloxanes, styrene, substituted benzenes, butylated hydroxytoluene (BHT), aldehydes and others. The obtained results suggest that VOC emissions decrease in a new car with time and are strongly temperature dependent. In Yoshida and Matsunaga study [7] as many as 162 organic compounds, involving many aliphatic and aromatic hydrocarbons, were identified in the interior air of a one new car. Total VOC

organiczne (SVOC): 240 – 260 °C do 380 – 400 °C oraz pyły i aerozole organiczne z temperaturami wrzenia > 380 °C. Można dokonać również innych podziałów, np. na podstawie charakteru chemicznego związków (alkany, węglowodory aromatyczne, aldehydy, ketony itp.), bądź ich potencjalnego wpływu na zdrowie ludzkie (drażniące, neurotoksyczne, rakotwórcze itp.) [2].

Zapach panujący w kabinie nowego samochodu wywołany jest przez mieszaninę różnych związków emitowanych z materiałów elementów wyposażenia. Lotne związki organiczne (LZO) związane z emisją z wyposażenia wnętrza pojazdu obejmują związki uwalniane z uszczelek, dywaników, detali z tworzyw sztucznych, klejów, farb, skóry oraz pianek służących jako wypełnienie. Innymi źródłami LZO mogą być środki czyszczące, dezodoranty, odświeżacze powietrza, smary, dym papierosowy, a nawet mikroorganizmy [3, 4, 5, 6, 7]. Kabina samochodu stanowi bardzo specyficzne środowisko ze względu na to, iż stosunek ilości materiałów zastosowanych do wykończenia wnętrza do objętości samego wnętrza jest znacznie większy niż w przeciętnym pomieszczeniu. Ponadto w okresie letnim temperatura we wnętrzu kabiny znacząco wzrasta, prowadząc do zwiększonej dyfuzji LZO i pojawienia się znacznie wyższych stężeń LZO niż w obiektach mieszkalnych. W zależności od elementu wyposażenia również wilgotność może znacząco wpływać na dyfuzję LZO. Ogólnie proces dyfuzji LZO z materiałów wyposażenia samochodu można podzielić na dwa typy. Pierwszy dotyczy rozpuszczalników stosowanych do produkcji polakierowanych detali oraz do produkcji klejów. Związki te uwalniane są bardzo szybko, stąd noszą nazwę związków o emisji kontrolowanej szybkością parowania. Drugi typ może występować w przypadku związków stanowiących dodatki modyfikujące i pozostałości nieprzereagowanych monomerów. W odniesieniu do tych substancji, zwanych związkami o emisji kontrolowanej szybkością dyfuzji, proces dyfuzji zachodzi przez dłuższy czas [7, 8].

Informacje na temat rodzaju i stężenia związków chemicznych uwalnianych z materiałów wyposażenia wnętrza samochodu są szczególnie istotne ze względu na ocenę skutków zdrowotnych wynikających z narażenia człowieka na ich działanie, jednak wciąż niewiele wiadomo na temat tego rodzaju zanieczyszczeń. Brown i Cheng wykazali w swojej pracy [9], iż głównymi zanieczyszczeniami występującymi w nowych samochodach są benzen, aceton, etylobenzen, izomery ksyleny, toluen oraz węglowodory. Większość z nich jest toksyczna i potencjalnie szkodliwa dla zdrowia, np. ksyleny stanowią czynniki upośledzające rozwój płodu, aceton powoduje podrażnienie śluzówek, benzen jest znanym czynnikiem rakotwórczym, natomiast etylobenzen został sklasyfikowany przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem jako potencjalny czynnik rakotwórczy [11]. Grabbs i wsp. [4] zidentyfikowali we wnętrzu czterech nowych samochodów ponad 60 LZO, z całkowitym stężeniem ogólnie przekraczającym stężenie wykryte w otaczającym powietrzu i silnie zmiennym w zależności od badanego samochodu. Jedyne cztery związki zostały wykryte we

(TVOC) concentrations, excluding formaldehyde, was approximately 14 mg/m³ on the day after delivery, which greatly exceeding the indoor guideline value (300 µg/m³), proposed by Seifert [12]. The concentrations of most compounds declined over time, but increased with a rise of interior temperature. These latter conclusions are also contained in Chien report [13]. This study examines inter-brand, intra-brand and intra-model variations in VOCs levels inside new cars. Screening tests for VOC from interior parts demonstrated that BHT was the most common present chemical. Long-chain aliphatic hydrocarbons, particularly C₁₄-C₁₇, toluene, xylenes and process-related compounds, such as plasticizers, were also identified in interior parts.

The current study was carried out with the intent to identify the maximal number of in-vehicle VOCs and assess the air quality in four new cars of the same model, but with different interiors, before they hit the market. Four different solid sorbents (Carbograph 1 TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B and Carbopack C/Carbopack B/ Carbosieve S III) were applied for the most efficient VOCs adsorption. The air samples were collected on sorbent tubes and analyzed, after thermal desorption, by gas chromatography coupled with mass detector and flame ionization detector (TD-GC-MS/FID).

2. Methodology

The vehicles under study included four new cars of the same model but with different interiors (Tab. 1). The examined vehicles were in good operating conditions, the car cabins were free of deodorizers and cigarette smoke, no

wszystkich badanych samochodach: toluen, etylobenzen, ksylen i undekan. Overton i Manura [11] wykonali badania na jednym nowym samochodzie celem wykrycia obecności LZO i zmian zachodzących w ich obrębie wraz z upływem czasu użytkowania samochodu. Przeprowadzone badania pozwoliły na identyfikację ponad 100 LZO, w tym wielu prostych i rozgałęzionych węglowodorów, siloksanów, styrenu, podstawionych pochodnych benzenu, butylovanego hydroksytoluenu (BHT), aldehydów i innych. Uzyskane wyniki sugerują, iż emisja LZO w nowym samochodzie obniża się z czasem i jest silnie zależna od temperatury. Z kolei praca Yoshida i Matsunaga [7] donosi o identyfikacji aż 162 związków organicznych pochodzących z wnętrza jednego nowego samochodu. Całkowite stężenie LZO, wyłączając formaldehyd, wyniosło w przybliżeniu 14 mg/m³ po upływie jednego dnia od dostarczenia samochodu, co znacznie przekracza proponowaną przez Seiferta wartość dopuszczalną (300 µg/m³) dla całkowitego stężenia LZO w powietrzu wewnętrznym [12]. Stężenia większości związków obniżały się w miarę upływu czasu, ale rosły wraz ze wzrostem temperatury we wnętrzu samochodu. Powyższe wnioski zawarte są również w raporcie Chiena [13]. Raport ten dotyczy badań nad różnicami w poziomach LZO emitowanych wewnątrz pojazdów, występujących pomiędzy poszczególnymi markami samochodów, w obrębie tej samej marki oraz tego samego modelu. Badania przesiewowe dla emisji LZO z wnętrza samochodów wykazały, iż BHT jest najpowszechniej występującym związkiem organicznym. Ponadto zidentyfikowano obecność długołańcuchowych węglowodorów alifatycznych, w szczególności C₁₄-C₁₇, toluenu, ksylenów oraz związków stosowanych jako plastyfikatory.

Badania opisane w tym artykule zostały przeprowadzone z zamiarem identyfikacji maksymalnej liczby LZO emitowanych z wnętrza samochodu oraz w celu określenia jakości powietrza w czterech nowych samochodach tego samego modelu, ale różniących się wyposażeniem, przed ich wprowadzeniem na rynek. Zastosowano cztery różne adsorbenty stałe (Carbograph 1 TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B i Carbopack C/Carbopack B/ Carbosieve S III) w celu zaadsorbowania jak największej liczby LZO. Próbkę powietrza pobierano na adsorbenty i analizowano, po wcześniejszej desorpcji termicznej, techniką chromatografii gazowej z detektorem masowym i detektorem płomieniowo-jonizacyjnym (TD-GC-MS/FID).

Table 1. Details of examined vehicles interiors

Tabela 1. Szczegóły dotyczące wyposażenia badanych samochodów

Car ID/oznaczenie samochodu	Upholstery/tapicerka	Steering wheel/kierownica	Dashboard/deska rozdzielcza
Car 1/samochód 1	Black fabric/czarny materiał	Black synthetic leather/czarna skóra syntetyczna	Black/czarna
Car 2/samochód 2	Black fabric/czarny materiał	Black natural leather/czarna skóra naturalna	Black + white/czarno-biała
Car 3/samochód 3	Checkered fabric/materiał w kratkę	White synthetic leather/biała skóra syntetyczna	Black + blue/czarno-niebieska
Car 4/samochód 4	Checkered fabric/materiał w kratkę	White natural leather/biała skóra naturalna	Black + red/czarno-czerwona

ventilated. All the experiments were conducted at outdoor parking space. Temperature, humidity and pressure inside the cars during sampling process were: 25 °C, 40% RH, 987 hPa.

The air samples from each vehicle were collected, separately, on thermal desorption tubes: Carbograph 1TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B, and Carbopack C/Carbopack B/Carbosieve SIII. Application of four different sorbents, with the main role of Carbograph 1TD and Tenax TA, allows the identification of a broad spectrum of organic compounds present in indoor air [14]. For every examined

Przedmiot badań stanowiły cztery nowe samochody tego samego modelu, ale różniące się wyposażeniem (tab. 1). Testowane samochody były w dobrym stanie technicznym, z kabinami wolnymi od środków odświeżających i dymu papierosowego, niewentylowane. Wszystkie pobory powietrza przeprowadzono na zewnętrznym placu parkingowym.

2. Metodyka

Przedmiot badań stanowiły cztery nowe samochody tego samego modelu, ale różniące się wyposażeniem (tab. 1). Testowane samochody były w dobrym stanie technicznym, z kabinami wolnymi od środków odświeżających i dymu papierosowego, niewentylowane. Wszystkie pobory powietrza przeprowadzono na zewnętrznym placu parkingowym.

car, sampling process was done for 20 minutes with air flow of 100 mL/min. The sampling of air from each car cabin was performed for all tested sorbents at the same time, by connecting sorbent tubes to the four independent sampling pumps (Gilair 3). Thermal desorption tubes were analyzed using thermal desorption system Unity2 (Markes). Thermal desorption parameters: desorption from tube at 300 °C for 15 min, cryotrapping at -30 °C, rapid heat up to 320 °C at about 60 °C/s, column pressure 23 psi, split ratio 5:1. The gas chromatographic system was coupled with flame ionization detector (Agilent 7098A) and a mass spectrometer (Agilent MSD 5975C). Gas chromatograph was equipped with column splitter which allowed sample analysis simultaneously on both, FID and MS, detectors. The capillary column DB-5ms UI (60 m x 1 µm x 0.32 mm) was applied.

Quantitative VOCs analysis was based on calibration curves obtained for toluene (Sigma-Aldrich), based on results from FID detector. Compounds were identified from their mass spectra by using the National Institute of Standards and Technology (NIST08) library. Only compounds with quality score of 80 and above were considered as identified. All chromatographic analysis were performed with use of deuterated toluene (99.6 atom %D, Sigma-Aldrich) as an internal standard.

3. Results and discussion

Four vehicles interiors were sampled over the course of this study. In case of each examined vehicle, four different sorbents (Carbograph 1 TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B and Carbopack C/Carbopack B/ Carbosieve S III) were applied to detect and identify the maximal number of VOCs from the car-cabins. Comparison of the number of VOCs identified in analyzed vehicles 1-4 (with quality score of 80 and above) is presented in Figure 1. The results showed that number of identified compounds was similar for cars 1 and 4 (152 and 154 compounds, respectively), slightly lower for car 3 (144 compounds) and noticeably higher for car 2 (192 identified compounds).

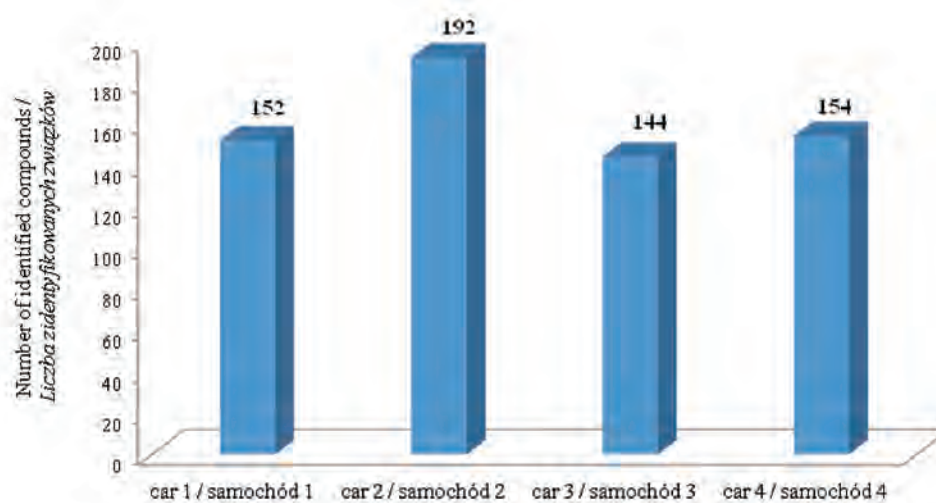


Fig. 1. Comparison of the number of VOCs identified in tested cars 1 – 4

Rys. 1. Porównanie liczby LZO zidentyfikowanych w badanych samochodach 1 – 4

Podczas poboru próbek w kabinach samochodów panowały następujące warunki temperatury, wilgotności i ciśnienia atmosferycznego: 25 °C, 40% wilgotności względnej i 987 hPa.

Próbki powietrza z wnętrza każdego samochodu były pobierane osobno na rurki wypełnione adsorbentami: Carbograph 1TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B, i Carbopack C/Carbopack B/Carbosieve SIII. Zastosowanie czterech różnych adsorbentów, z głównym udziałem Carbograph 1 TD oraz Tenax TA, pozwoliło na identyfikację szerokiego spektrum związków organicznych obecnych w powietrzu wewnątrz kabiny samochodu [14]. Dla każdego badanego samochodu próbki powietrza były pobierane przez 20 minut z przepływem 100 mL/min. Proces poboru powietrza z każdej kabiny samochodowej odbywał się dla wszystkich adsorbentów w tym samym czasie, z wykorzystaniem czterech niezależnych pomp (Gilair 3). Adsorbenty z pobranymi próbkami powietrza poddano desorpcji termicznej z wykorzystaniem termodesorbera Unity2 (Markes). Podczas procesu desorpcji panowały następujące warunki: temperatura desorpcji 300 °C przez 15 min, następnie uwolnione związki zatrzymywane były na pułapce wymrażającej o temperaturze -30 °C i gwałtownie ogrzewane do temperatury 320 °C z szybkością ok. 60 °C/s, ciśnienie na kolumnie chromatograficznej wynosiło 23 psi, split 5:1. Stosowany układ chromatograficzny wyposażony był w detektor płomieniowo-jonizacyjny (Agilent 7098A) oraz detektor masowy (Agilent MSD 5975C). Zastosowano splitter (dzielnik strumienia gazów) pozwalający na jednoczesną analizę z wykorzystaniem obydwu detektorów, FID oraz MS. Wykorzystano kapilarną kolumnę DB-5ms UI (60 m x 1 µm x 0,32 mm).

Analizę ilościową LZO przeprowadzono, opierając się na krzywych kalibracyjnych uzyskanych dla wzorca toluenu (Sigma-Aldrich), dla wyników uzyskanych przy zastosowaniu detektora FID. Identyfikacja związków odbyła się na podstawie ich spektrogramów masowych z zastosowaniem

biblioteki widm masowych NIST08. Za zidentyfikowane uznano wyłącznie związki z dopasowaniem do bazy NIST08 z prawdopodobieństwem nie mniejszym niż 80%. Wszystkie analizy chromatograficzne prowadzono w obecności deuterowanego toluenu (99,6 atom %D, Sigma-Aldrich) jako wzorca wewnętrznego.

3. Wyniki i dyskusja

Badania opisane w niniejszej pracy obję-

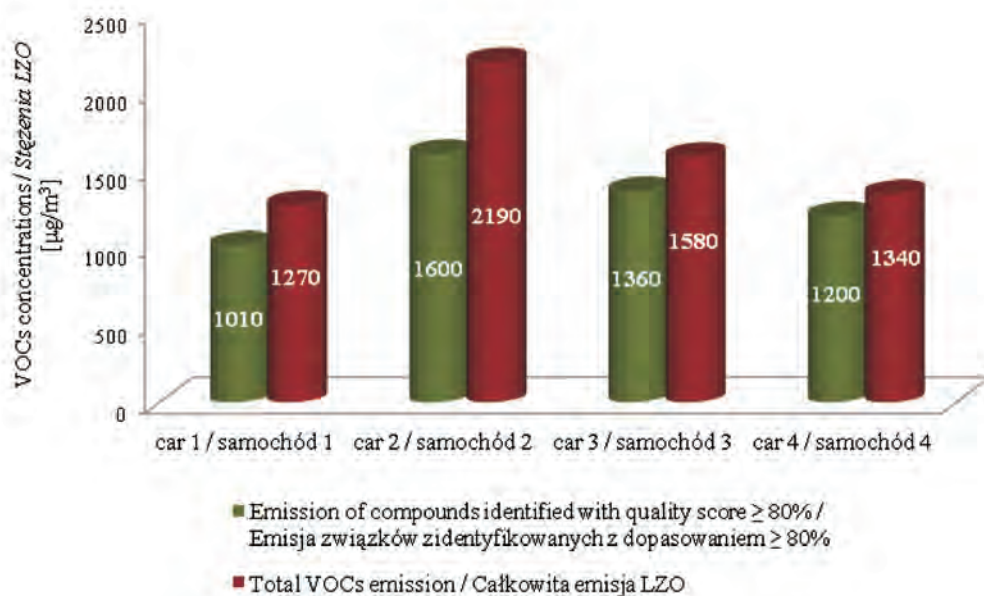


Fig. 2. Concentrations of VOCs identified in tested cars 1 – 4
Rys. 2. Stężenia LZO zidentyfikowanych w badanych samochodach 1 – 4

Figure 2 presents the concentrations of VOCs identified in four tested vehicles, by application of all sorbents. The results of quantitative VOCs analysis were based on calibration curves prepared for individual sorbents used in this study. Determination of TVOC emission was performed with application of sorbent Carbograph 1 TD, selected previously as a most relevant sorbent for detection of VOCs from car interior [14]. The estimated VOCs level for air sample collected from cabin of car 1 was $1010 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (79% of TVOC emission), car 2 – $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (73% of TVOC emission), car 3 – $1360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (87% of TVOC emission) and for car 4 – $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (89% of TVOC emission). In each case, the interior TVOC concentrations exceeded the indoor guideline values proposed by Seifert [12]. The other finding was that the highest value of VOCs emission for air sample from car 2, is correlated with the greatest number of identified compounds in case of this vehicle.

Figure 3 presents the percent contribution of main groups of organic compounds in number of VOCs identified in tested cars 1-4. In all examined vehicles, alkanes were the main class of chemicals occurring in car-cabins interior (20 – 25%). High number of cycloalkanes (16 – 20%), aromatic hydrocarbons (15 – 21%) and compounds marked as others (14 – 24%) was also noticed. The share below 10% was observed for group consisting of alcohols, ethers, esters (8 – 10%) and aldehydes with ketones (4 – 8%). Terpenes (1 – 2%) were the least frequently represented class of identified VOCs. Presented data indicate, that there was no significant differences in contribution of main classes of organic compounds in number of identified VOCs, between examined vehicles. However, some important differences might appear in case of individual compound share in each groups of organic compounds.

ły pobory powietrza z wnętrza czterech samochodów. Dla wszystkich badanych samochodów do wykrycia i identyfikacji maksymalnej liczby LZO występujących w kabinach samochodowych zastosowano cztery różne adsorbenty (Carbograph 1 TD, Tenax TA, Tenax GR/Carbopack B i Carbopack C/Carbopack B/Carbosieve S III). Porównanie liczby zidentyfikowanych LZO (z dopasowaniem do bazy NIST08 z prawdopodobieństwem $\geq 80\%$) w badanych samochodach 1 – 4 przedstawiono na rys. 1. Uzyskane wyniki wykazały, że liczba zidentyfikowanych związków była podobna dla samochodów 1 i 4 (odpowiednio 152 i 154 związki), nieco niższa dla samochodu 3 (114 związki) i znacząco wyższa dla samochodu 2 (192 zidentyfikowane związki).

Na rysunku 2 przedstawiono stężenia LZO zidentyfikowanych w czterech badanych samochodach, przy zastosowaniu wszystkich adsorbentów. Wyniki ilościowej analizy LZO uzyskano, opierając się na krzywych kalibracyjnych przygotowanych dla poszczególnych adsorbentów użytych w badaniach. Oznaczenie całkowitej emisji LZO przeprowadzono z wykorzystaniem adsorbentu Carbograph 1 TD, wybranego uprzednio jako najbardziej uniwersalny adsorbent do detekcji LZO z wnętrza samochodów [14]. Poziom LZO zidentyfikowanych w próbce powietrza pobranej z kabiny samochodu 1 wyniósł $1010 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (79% całkowitej emisji LZO), z kabiny samochodu 2 – $1600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (73% całkowitej emisji LZO), dla samochodu 3 – $1360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (87% całkowitej emisji LZO) i dla samochodu 4 – $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (89% całkowitej emisji LZO). We wszystkich badanych samochodach całkowita emisja LZO przekroczyła proponowane przez Seiferta dopuszczalne wartości stężeń LZO [12]. Ponadto zaobserwowano, że najwyższa emisja LZO w przypadku próbki powietrza z samochodu 2 skorelowana jest z największą liczbą zidentyfikowanych związków uzyskaną dla tego samochodu.

Na rysunku 3 przedstawiono procentowy udział głównych klas związków organicznych w liczbie LZO zidentyfikowanych w badanych samochodach 1 – 4. We wszystkich przypadkach alkanany stanowiły główną klasę związków organicznych występujących wewnątrz kabin samochodowych (20 – 25%). Zaobserwowano również obecność dużej liczby

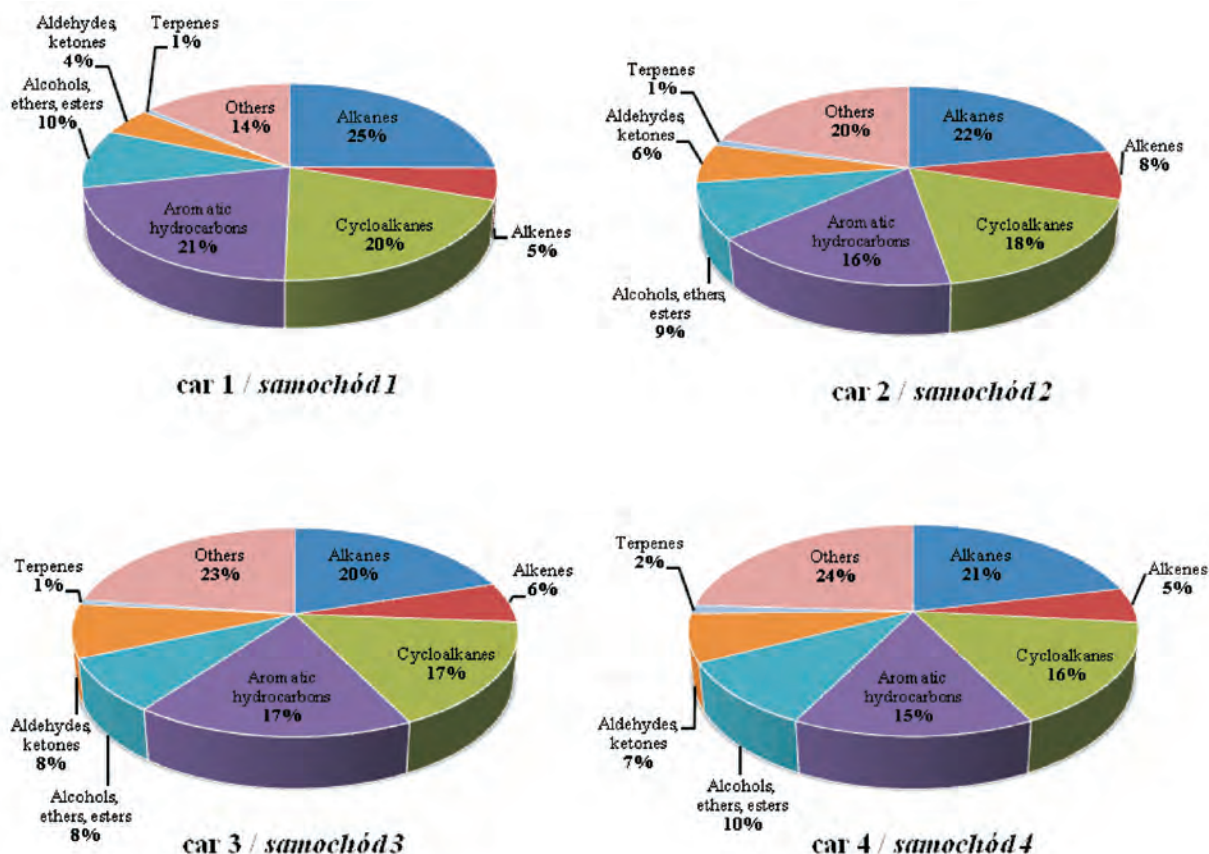


Fig. 3. The percent contribution of main groups of organic compounds in number of VOCs identified in tested cars 1 – 4

Rys. 3. Procentowy udział poszczególnych klas związków organicznych w liczbie LZO zidentyfikowanych w badanych samochodach 1 – 4

Aromatic hydrocarbons are a group of compounds containing a number of VOCs particularly harmful to human health, therefore detailed analysis of this class of chemicals was performed. Comparisons of aromatic hydrocarbons concentrations, depending on tested vehicle, are presented in Figure 4 and 5 (two graphs due to significant differences in aromatic VOCs emission). Presented results include only those compounds that were detected in at least two of four tested vehicles. Our data pointed out that the main aromatic air pollutants, occurring inside car cabins, were xylene isomers (8 – 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), toluene (10–56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), benzoic acid (33 – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ethylbenzene (15 – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and trimethylbenzene (9 – 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). High concentrations of toluene, ethylbenzene and xylenes are correlated, because these solvents are originally used as mixture and none of single compound reaches a high level in car-cabin air [8]. The highest concentrations of aromatic VOCs, including mentioned above, was observed for car 2. In case of other tested cars (1, 3 and 4), the concentrations of most aromatic VOCs were much lower. Obtained results demonstrated, for car 3 and 4, remarkable similarities in distribution of individual aromatic VOC concentrations. These resemblances probably occurred due to the vehicles interior – car 3 and 4 were equipped with identical checkered fabric material with likely similar

cykloalkanów (16 – 20%), węglowodorów aromatycznych (15 – 21%) i związków z grupy oznaczonej jako inne (14 – 24%). Poziom poniżej 10% zaobserwowano w przypadku grupy składającej się z alkoholi, eterów i estrów (8 – 10%) oraz dla aldehydów i ketonów (4 – 8%). Najmniej licznie reprezentowaną klasę zidentyfikowanych LZO stanowiły terpeny (1 – 2%). Przedstawione wyniki wykazują, iż pomiędzy badanymi samochodami nie występują znaczące różnice w udziale głównych klas związków organicznych w liczbie zidentyfikowanych LZO. Jednakże istotne różnice mogą pojawić się na etapie rozpatrywania udziału pojedynczych składników występujących w poszczególnych klasach związków organicznych.

Węglowodory aromatyczne stanowią grupę związków zawierających liczne LZO szczególnie szkodliwe dla ludzkiego zdrowia, wobec czego przeprowadzono szczegółową analizę tej klasy związków organicznych. Porównanie stężeń węglowodorów aromatycznych, w zależności od badanego samochodu, przedstawiono na rys. 4 i 5 (prezentacja dwóch wykresów spowodowana znacznymi różnicami w emisji aromatycznych LZO). Przedstawione wyniki obejmują tylko te związki, których obecność stwierdzono w co najmniej dwóch z czterech testowanych samochodów. Głównymi aromatycznymi zanieczyszczeniami powietrza wewnątrz kabin samochodowych są izomery ksyleneń

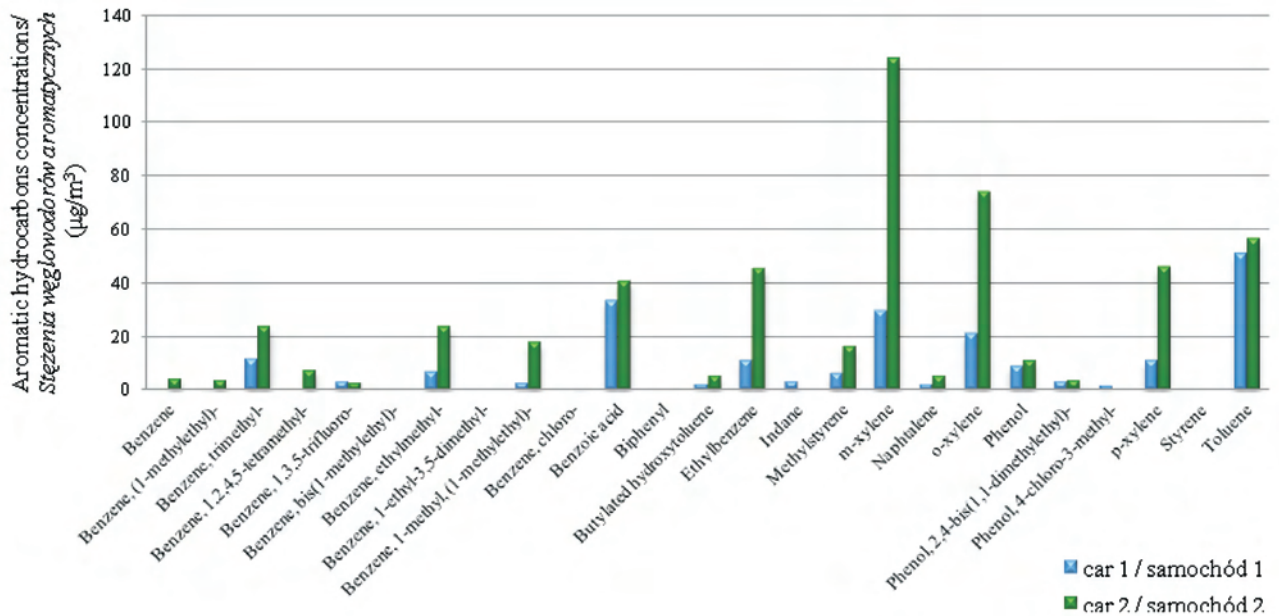


Fig. 4. Comparison of concentrations of aromatic hydrocarbons identified in cars 1 and 2

Rys. 4. Porównanie stężeń węglowodorów aromatycznych zidentyfikowanych w samochodach 1 i 2

VOCs emission, but different than in case of car 1 and 2, equipped in black fabric upholstery.

All VOCs, identified in case of four tested cars, were compared in order to find repeated compounds (Fig. 6). The number of 330 chemicals were presented in cabins of at least one examined vehicle, 169 VOCs – in at least two tested cars, 88 – in at least three tested cars and, finally, 54 organic compounds were identified in all examined vehicles. List of classified VOCs occurring in cabins of all tested car is presented in Table 2.

(8 – 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), toluen (10 – 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), kwas benzoesowy (33 – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), etylobenzen (15 – 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) i trimetylobenzen (9 – 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Wysokie stężenia toluenu, etylobenzenu i ksylenów są ze sobą powiązane, ponieważ rozpuszczalniki te używane są w mieszaninie i jako pojedyncze składniki nigdy nie osiągną wysokiego poziomu emisji w powietrzu w wnętrzu samochodów [8]. Najwyższe stężenia aromatycznych LZO, w tym omawianych powyżej, zaobserwowano dla samochodu 2. Dla pozostałych badanych samochodów (1, 3 i 4) stężenia większości aromatycznych

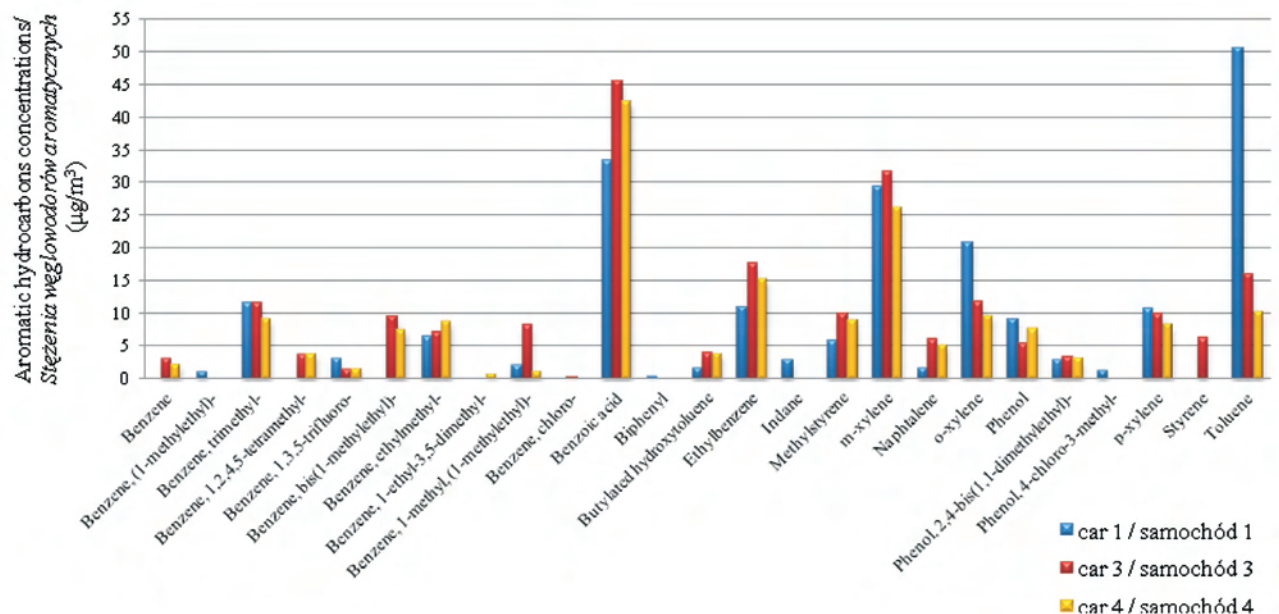


Fig. 5. Comparison of concentrations of aromatic hydrocarbons identified in cars 1, 3 and 4

Rys. 5. Porównanie stężeń węglowodorów aromatycznych zidentyfikowanych w samochodach 1, 3 i 4

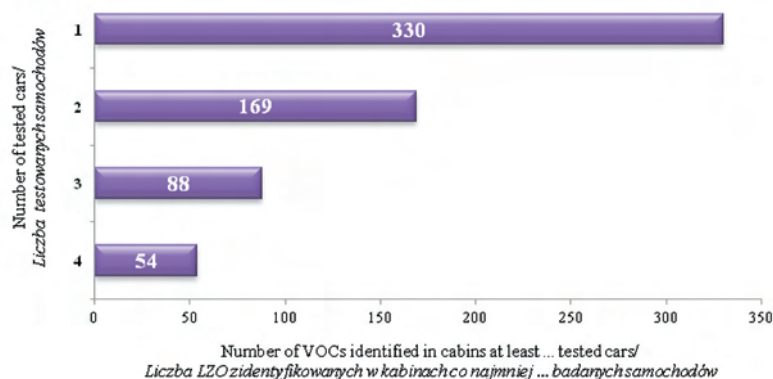


Fig. 6. Comparison of number of VOCs repeated in cabins of tested cars 1 – 4

Ry. 6. Porównanie liczby LZO powtarzających się w kabinach badanych samochodów 1 – 4

On the basis of results from Table 2, the main air pollutants identified in all car cabins were compounds from class of alkanes and aromatic hydrocarbons. The other group of organic compounds were cycloalkanes, alcohols with phenols, esters and aldehydes. One alkene, one ketone and number of others unclassified compounds were also identified.

Table 2. List of VOCs occurring in cabins of all examined vehicles

Tabela 2. Wykaz LZO występujących w kabinach wszystkich badanych samochodów

Compound name/nazwa związku	
Alkanes/alkany	
Heptane, 2,4-dimethyl-	Butylated hydroxytoluene
Decane	Ethylbenzene
Decane, 2-methyl-	Xylenes (isomers)
Decane, 3-methyl-	Toluene
Decane, 4-methyl-	Methylstyrene
Undecane	
Undecane, 2-methyl-	Alcohols and phenols/alkohole i fenole
Undecane, 4-methyl-	1-butanol
Undecane, 3,6-dimethyl-	Phenol
Dodecane	Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-
Tridecane	
Tetradecane	Aldehydes/aldehydy
	Benzaldehyde
	Furfural
Cycloalkanes/cykloalkany	
Cyclohexane	Ketones/ketony
Cyclohexane, methyl-	Phenyl methyl ketone
Cyclohexane, isothiocyanato-	
Cyclododecane	Esters/estry
cis-decalin, 2-syn-methyl-	Diethyl phthalate
Naphthalene, decahydro-, trans-	Ethyl acetate
	2-butoxyethyl acetate
Alkenes/alkeny	
1-dodecene	Others/inne
Aromatic hydrocarbons/węglowodory aromatyczne	1(3h)-isobenzofuranone
Octane, 4-methyl-	Acetic acid
Benzene	Benzoic acid
Benzene, 1,3,5-trifluoro-	Bicyclo[2.2.1]hept-2-ene,5-ethylidene-
Benzene, 1,2,3-trimethyl-	Butyrolactone
Benzene, 1,3,5-trimethyl-	Cyclodecene, 1-methyl-
Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	Phenylmaleic anhydride
Benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-	Phthalic anhydride
Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	Silane, dimethoxydimethyl-
	Silanol, trimethyl-

LZO wykazały znacznie niższy poziom. W odniesieniu do samochodów 3 i 4 uzyskane wyniki wykazały istotne podobieństwa w zakresie rozkładu stężeń poszczególnych aromatycznych LZO. Podobieństwa te prawdopodobnie wynikają z wyposażenia wnętrza samochodów – samochód 3 i 4 wyposażone były w identyczną tapicerkę z materiału w kratkę, najprawdopodobniej z podobną emisją LZO, odmienną od emisji występującej dla samochodów 1 i 2 wyposażonych w tapicerkę z czarnej tkaniny.

Wszystkie LZO zidentyfikowane dla próbek powietrza z czterech badanych samochodów zostały porównane celem znalezienia powtarzających się związków (rys. 6). Wyodrębniono 330 związków obecnych w co najmniej jednym z badanych samochodów, 169 LZO – dla co najmniej dwóch samochodów, 88 – dla co najmniej trzech badanych samochodów, natomiast we wszystkich samochodach zidentyfikowano obecność 54 związków organicznych. Wykaz LZO występujących w kabinach wszystkich badanych samochodów z podziałem na grupy przedstawiono w tabeli 2.

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 2 można stwierdzić, że głównymi zanieczyszczeniami powietrza zidentyfikowanymi we wszystkich kabinach samochodowych były związki z grupy alkanów i węglowodorów aromatycznych. Ponadto oznaczono związki należące do grup cykloalkanów, alkoholi i fenoli, estrów oraz aldehydów. Wykryto również obecność jednego alkeny, jednego ketonu i wiele innych, niesklasyfikowanych związków organicznych.

Elementy wyposażenia wnętrza samochodu, takie jak plastikowe detale, tapicerka, dywaniki, kleje, smary i inne stanowią główne źródło LZO występujących wewnątrz kabin nowych samochodów. Alkany, zwłaszcza długołańcuchowe węglowodory alifatyczne (C₁₄-C₁₇), emitowane są ze smarów używanych do smarowania części mechanicznych, takich jak szyny siedzeń [4]. Siloksany mogą pochodzić z preparatów służących do czyszczenia i smarowania [11], a także z pianki poliuretanowej, gdzie służą jako stabilizatory. Kleje stosowane przy produkcji różnych części wewnętrznych są prawdopodobnie głównym źródłem takich związków, jak: tolu-

Interior components, such as plastic moldings, upholstery, carpeting, adhesives, lubricants and others, are the main sources of VOCs occurring in air of new car cabins. Alkanes, especially long-chain aliphatic hydrocarbons (C₁₄-C₁₇ hydrocarbons) are emitted from the greases that are used to lubricate mechanical parts such as seat rails [4]. Siloxanes may be derived from cleaning and lubricating products [11], also from polyurethane foam, where serve as foam stabilizers. Adhesives, that are applied to manufacture various interior parts, are probably the main source of toluene, xylenes, trimethylbenzenes, naphthalenes and number of other chemicals detected inside the cabins [13]. Styrene emission may be associated with off-gassing from new carpets (emission from styrene-butadiene-rubber latex) or from plastic components of the vehicle interiors [4, 11]. Carpets (also carpet cushions), varnishes, paints and adhesives based on epoxy resins are potential sources of phenolic compounds. Moreover, carpets with styrene-butadiene-rubber and polyurethane backings or textile backing, but with styrene-butadiene latex precoat are the sources of halogenated aromatic compounds (e.g. trifluorobenzenes) [15]. Butylated hydroxytoluene (BHT) is a common anti-oxidant applied in leather, synthetic rubber and plastic treatments [11, 13]. Phthalates are used mainly as plasticizers for vinyl resins or plastics, moreover these compounds are presented in adhesives (mainly polychlorobutadiene) used to manufacture interior parts [13]. Acetic acid emission is associated with application of paints, coatings, adhesives, for example products based on polyvinyl acetate, acid-cured silicone and cleaning agents [16]. Benzoic acid is a compound used in the production of plasticizers in adhesive formulations; it is also used to improve the properties of alkyd resins for paints and coatings and as a rubber polymerization retarder [17].

4. Conclusions

The aim of this work was to perform possibly complete identification and quantitative determination of VOCs from the interior of four new cars. Application of four different-type sorbents allows to detect broad spectrum of organic compounds – the total number of 330 VOCs were identified in the interior air of tested cars. Obtained data showed high VOCs concentrations, in all cases exceeded the indoor guideline values. Alkanes, aromatic hydrocarbons and cycloalkanes were found to be the classes with major contribution in total VOC emission. Detailed analysis of aromatic hydrocarbons group revealed xylene isomers, toluene, benzoic acid, ethylbenzene and trimethylbenzene as the main aromatic air pollutants.

Presented results shows that new car's users are exposed to a wide variety of potentially harmful VOCs, emitted from interior components. Improving the air quality area in the car-cabins is particularly important for the reduction of VOCs emission, by finding possible sources of contaminations (proper components) and eliminating them from vehicle interior.

en, ksyleny, trimetylobenzeny, naftaleny i wielu innych związków wykrytych wewnątrz kabin samochodów [13]. Emisja styrenu może być związana z uwalnianiem tego związku z nowych dywaników (emisja z lateksu styrenowo-butadienowego) lub elementów wyposażenia samochodu wykonanych z tworzyw sztucznych [4, 11]. Dywaniki (w tym materiały wygłuszające), farby, lakiery i kleje epoksydowe są potencjalnymi źródłami związków fenolowych. Ponadto styrenowo-butadienowe dywaniki gumowe, dywaniki poliuretanowe i tekstylne, ale pokryte powłoką z lateksu styrenowo-butadienowego, stanowią źródło halogenowanych związków organicznych (np. trifluorobenzenów) [15]. Butylowany hydroksytoluen (BHT) jest powszechnym antyoksydantem stosowanym przy produkcji skóry, gumy syntetycznej i tworzyw sztucznych [11, 13]. Ftalany używane są głównie jako plastyfikatory przy produkcji żywic winylowych oraz tworzyw sztucznych, ponadto związki te są obecne w klejach (głównie w kleju polichlorobutadienowym) stosowanych przy produkcji elementów wyposażenia [13]. Emisja kwasu octowego może pochodzić od farb, lakierów, klejów, np. produktów na bazie octanu poliwinylowego, uszczelniaczy silikonowych utwardzanych kwasem i środków czyszczących [16]. Kwas benzoesowy jest związkiem wykorzystywanym do produkcji plastyfikatorów stosowanych do wytwarzania preparatów adhezyjnych; używany jest ponadto do poprawy właściwości żywic alkidowych stosowanych do wytwarzania farb i powłok kryjących oraz jako spowalniacz procesu polimeryzacji tworzyw gumowych [17].

4. Wnioski

Celem niniejszej pracy było przedstawienie przeprowadzonej jak najbardziej kompletnej identyfikacji LZO i wyznaczenie stężeń związków organicznych występujących we wnętrzu czterech nowych samochodów. Zastosowanie czterech różnych adsorbentów pozwoliło na wykrycie szerokiego spektrum związków – we wnętrzu badanych samochodów zidentyfikowano całkowitą liczbę 330 LZO. Uzyskane wyniki wykazały wysokie stężenia LZO, we wszystkich przypadkach przekraczające dopuszczalne wartości dla powietrza wewnętrznego. Stwierdzono, iż alkanany, węglowodory aromatyczne i cykloalkany mają największy udział w całkowitej emisji LZO. Szczegółowa analiza grupy obejmującej węglowodory aromatyczne wykazała, iż głównymi aromatycznymi zanieczyszczeniami powietrza są: izomery ksylenu, toluen, kwas benzoesowy, etylobenzen oraz trimetylobenzen.

Przedstawione wyniki wykazały, iż użytkownicy nowych samochodów narażeni są na działanie licznych potencjalnie szkodliwych LZO emitowanych z wyposażenia wnętrza samochodu. Poprawa jakości powietrza w kabinie samochodowej jest szczególnie istotna z punktu widzenia obniżenia emisji LZO, co można zrealizować przez zidentyfikowanie możliwych źródeł zanieczyszczeń (odpowiedni element wyposażenia) i wyeliminowanie ich z wnętrza samochodu.

Acknowledgements

This work was supported by Polish Ministry of Science and Higher Education (project No. N509 480438).

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach projektu rozwojowego finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (projekt Nr N509 480438).

Bibliography/Literatura

- [1] ECA-IAQ (European Collaborative Action "Indoor Air Quality and its Impact on Man"), Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations. Report No 19, EUR 17675 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities 1997.
- [2] WHO (World Health Organisation), Indoor air quality: organic pollutants. Euro Reports and Studies No. 111. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe 1989.
- [3] Fedoruk M.J., Kerger B.D.: Measurement of volatile organic compounds inside automobiles. *J Environ Eng* 2003, 13, p. 31-41.
- [4] Grabbs J.S., Corsi R.L., Torres V.M.: Volatile organic compounds in new automobiles: screening assessment. *J Environ Eng* 2000, 126 (10), p. 974-977.
- [5] Yo W.K., Yu C.H.: Public bus and taxicab drivers work-time exposure to aromatic volatile organic compounds. *Environ Res* 2000, 86 (1), p. 66-72.
- [6] Rose L.J., Simmons R.B., Crow S.A., Ahearn D.G.: Volatile organic compounds associated with microbial growth in automobile air conditioning systems. *Curr Microbiol* 2000, 41, p. 206-209.
- [7] Yoshida T., Matsunaga I.: A case study on identification of airborne organic compounds and time courses of their concentrations in the cabin of a new car for private use. *Environ Int* 2006, 32 (1), p. 58-79.
- [8] Sato S.: Air-Quality in Auto-Cabin. R&D Review of Toyota CRDL 2004, 39, p. 36-43.
- [9] Brown S.K., Cheng M.: Volatile organic compounds (VOCs) in new car interiors. 15th International Clean Air & Environment Conference. Sydney, CASANZ, 2000, p. 464-46.
- [10] International Agency for Research on Cancer (IARC), Group 2B: possibly carcinogenic to humans, 2000.
- [11] Overton S.V., Manura J.J.: Identification of volatile organic compounds in a new automobile. SIS Application Note 36a, Scientific Instrument Services 1999.
- [12] Seifert B.: Volatile organic compounds. In: Maroni M, Seifert B, Lindvall T, editors. Indoor air quality. A comprehensive reference book. Air quality monographs, vol. 3. Netherlands: Elsevier Science 1995, p. 819-822.
- [13] Chien Y.C.: Variations in amounts and potential sources of volatile organic chemicals in new cars. *Sci Total Environ* 2007, 383, p. 228-239.
- [14] Gołda-Kopek A., Faber J., Łomankiewicz D., Brodzik K., Nowak J., Świątek A.: Identification of in-vehicle volatile organic compounds by adsorption/thermal desorption-GC/MS. Proceedings of Air Quality-Science and Application, Athens, Greece 2012.
- [15] Sollinger S., Levsen K.: Indoor pollution by organic emissions from textile floor coverings: climate test chamber studies under static conditions. *Atmos Environ* 1994, 28 (14), p. 2369-2378.
- [16] Organic Indoor Air Pollutants: Occurrence, Measurement, Evaluation. 2nd edition, WILEY-VCH 2009.
- [17] IPCS (International Programme on Chemical Safety), Benzoic acid and sodium benzoate. Concise International Chemical Assessment Document No 26, Geneva: World Health Organization 2000.

Anna Gołda-Kopek, PhD. – research-technical specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr Anna Gołda-Kopek – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.
e-mail: anna.golda-kopek@bosmal.com.pl



Joanna Faber, MEng. – research specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr inż. Joanna Faber – specjalista ds. badań w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL SP. z o.o., Bielsko-Biała.
e-mail: joanna.faber@bosmal.com.pl



Damian Łomankiewicz, MSc. – chemical laboratory manager, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr Damian Łomankiewicz – kierownik Pracowni Chemicznej, Zakład Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.
e-mail: damian.lomankiewicz@bosmal.com.pl



Krzysztof Brodzik, DEng. – research-technical specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr inż. Krzysztof Brodzik – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.
e-mail: krzysztof.brodzik@bosmal.com.pl



Joanna FABER
Krzysztof BRODZIK
Damian ŁOMANKIEWICZ
Anna GOŁDA-KOPEK
Jan NOWAK
Antoni ŚWIĄTEK

Temperature influence on air quality inside cabin of conditioned car

In present work results of researches on influence of temperature on air quality inside vehicle are presented. One new car was tested in different atmospheric conditions, after conditioning in climate chamber. Air quality was evaluated on the basis of detected volatile organic compounds (VOC) and calculated as toluene equivalent. Samples were collected onto solid sorbents and examined, after thermal desorption, with the use of gas chromatography (GC) method with flame ionisation (FID) and mass spectrometry (MSD) detectors.

Key words: air quality, indoor air, car cabin, VOC

Wpływ temperatury na jakość powietrza wewnątrz kabiny samochodu kondycjonowanego

W artykule opisano badania wpływu temperatury na jakość powietrza wewnątrz kabiny samochodu. Badaniom poddano jeden nowy samochód, który był kondycjonowany w różnych warunkach atmosferycznych w komorze klimatycznej. Jakość powietrza oceniono na podstawie emisji lotnych związków organicznych (LZO) oznaczonych i obliczonych jako równoważnik toluenu. Próbkę były pobierane na sorbenty stałe i badane, po przeprowadzeniu desorpcji termicznej, metodą chromatografii gazowej (GC) z detekcją płomieniowo-jonizacyjną (FID) i spektrometrią mas (MSD).

Słowa kluczowe: jakość powietrza, powietrze wewnętrzne, kabina samochodu, LZO

1. Introduction

Nowadays, a human is surrounded by different kind of pollution, including air, water and bioenvironmental pollution. Various health organizations divided air pollutants into organic, inorganic and particular matter, but probably the main air pollutant, especially concerning indoor air, are organic volatile compounds (VOCs). Zabiegała [11] found that over 200 organic pollutants, mainly volatile organic compounds, can be identified in the indoor environment.

Mentioned above volatile organic compounds, according to The World Health Organization (WHO) [6], are all organic compounds, excluding pesticides, present as a vapour or gas in normal ambient temperature. In European Collaborative Action (ECA) Report no 19 [2] and according to WHO (1989) [6], VOCs were divided into four subclasses concerning their boiling-point range. Volatile Organic Compounds responsible for odour, which can be perceptible for human being, are the ones belonging to the group with boiling-point range within 50 to 260 °C. Another division can be made concerning chemical character of organic compounds (according to Appendix 1 to ECA Report no 19) and that approach will be used in present paper. VOCs can be divided into: aliphatic hydrocarbons (including alkenes), aromatic hydrocarbons, cycloalkanes, alcohols, aldehydes, ketones, glycol and glycoethers, acids, esters, halocarbons, acids terpenes and others. The authors of ECA Report no 19 suggested to include minimum 63 organic compounds in total VOC (TVOC) analysis. In present paper TVOC analysis included both all suggested

1. Wstęp

W obecnych czasach człowiek jest otoczony różnego typu zanieczyszczeniami, obejmującymi zarówno zanieczyszczenia powietrza oraz wody, jak i środowiska. Różne organizacje zdrowia dzielą zanieczyszczenia powietrza na: zanieczyszczenia organiczne, nieorganiczne i cząstki stałe, jednak za jedno z głównych zanieczyszczeń powietrza, szczególnie rozpatrując powietrze wewnętrzne, można uznać lotne związki organiczne (LZO). Zabiegała [11] podaje, że w środowisku wewnętrznym można zidentyfikować ponad 200 zanieczyszczeń organicznych, będących głównie lotnymi związkami organicznymi.

Wspomniane wyżej lotne związki organiczne, zgodnie z definicją Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) [6], oznaczają wszystkie związki organiczne, z wyłączeniem pestycydów, które są obecne w postaci pary lub formy gazowej w normalnej temperaturze otoczenia. W Raporcie nr 19 organizacji ECA [2] oraz WHO (1989) [6] LZO zostały podzielone na 4 podgrupy, uwzględniając zakres ich temperatur wrzenia. Za zapach, który może być wyczuwalny przez ludzi odpowiedzialne są lotne związki organiczne o temperaturach wrzenia od 50 do 260 °C. Inny podział, który może być zastosowany, opiera się na chemicznym charakterze związków organicznych i to podejście będzie wykorzystane w niniejszej pracy. Zgodnie z Załącznikiem nr 1 do Raportu nr 19 ECA, LZO mogą być podzielone na: węglowodory alifatyczne (włączając alkeny), węglowodory aromatyczne, cykloalkany, alkohole, aldehydy, ketony, glikole i glikoetery, kwasy organiczne, estry, halogenopochodne węglowodorów, terpeny i inne. Autorzy Raportu nr 19 sugerują również, żeby

63 organic compounds and others, with a considerable participation in TVOC emission.

Many reports of health organizations indicate a negative impact of VOCs exposition on human health. Some of organic compounds, like acetophenone, propylbenzene or tridecane, are eye, skin and/or respiratory system irritant, while others, like heptane and its isomers or buthyl acetate may also cause drowsiness, nausea and headache. Few organic compounds are reported to be carcinogenic, among them there are such compounds as furfural, benzene and styrene. Besides a possible negative health effect, a long-time exposition can also lead to sensory irritation of car user. In ECA Report [2] the effects of VOCs exposition on human health were reviewed. According to that report, in most cases, TVOC concentration in non-industrial indoor environment do not exceed $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.

In car cabin, which is a specific indoor environment, TVOC concentration may be at higher level due to both much lower area than average room with greater amount of details used to equip car interior and higher temperature inside vehicle (exposition to direct sunlight). Fedoruk et. al. [3] found out that compounds: benzene, toluene, ethylbenzene, xylenes, styrene, undecane and buthyl acetate are present in new car at the concentration level of $1\ 076\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ and alkyl-compounds of benzene are the main pollutants in indoor air. On the other hand, Yoshida et. al. [9] found TVOC in car cabin at concentration of $14\ 081\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, with the main pollutants including aromatic compounds ($5\ 947\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) and alkanes ($7\ 294\ \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Concerning those differences in determined TVOC concentration and composition, car intra-brand and intra-model dissimilarities, TVOC should be checked in controlled and static test conditions in order to determine real TVOC concentration inside vehicle. It is especially important taking into account that car driver may spend a considerable part of day inside vehicle [8, 11].

Concentration of VOCs and their nature is strictly connected with interior components and materials which they are made from [1, 8]. Johansson claimed [7], that within a weeks or months VOCs concentration inside car cabin decreases down to low level, but complete elimination of emitted organic compounds is impossible [11]. Moreover concentration of different VOCs may vary in time and is dependent on the interior temperature, since high temperature encourages higher emission of VOCs from indoor materials [3, 8, 10, 11]. However, probably with interior temperature increase not only VOC concentration increases, but also composition and/or kind of chemical group present in VOCs mixture changes. Zabiegała [11] suggested, that determination of total organic pollution of air is more representative and useful than determining individual compound concentration. However, knowledge about chemical composition and concentration of mixture VOCs emitted is very useful in order to find the source of air pollution and to eliminate the main indoor air pollutant.

The aim of this work was to:

- check whether changes of ambient temperature has a significant influence on TVOC emission inside car cabin,

do analizy całkowitej zawartości LZO (CLZO) włączyć minimum 63 związki organiczne. W niniejszym artykule analiza całkowitej zawartości LZO opierała się zarówno na sugerowanych 63 związkach organicznych, jak i innych, mających znaczący udział w całkowitej emisji LZO.

Wiele opracowań organizacji zdrowia wskazuje na możliwy negatywny wpływ na zdrowie człowieka narażenie na LZO. Niektóre związki organiczne, jak acetofenon, propylbenzen lub tridekan działają drażniąco na oczy, skórę lub/i układ oddechowy człowieka, podczas gdy inne, jak heptan i jego izomery lub octan butylu mogą również powodować senność, nudności i ból głowy. Niektóre ze związków organicznych, jak furfural, benzen i styren są uważane za rakotwórcze. Oprócz negatywnego wpływu na zdrowie długotrwałe narażenie na LZO może również prowadzić do podrażnienia zmysłów i irytacji użytkowników. W Raporcie ECA [2] zostały zestawione efekty narażenia ludzi na LZO. Zgodnie z tym Raportem, w większości przypadków, całkowite stężenie LZO w nieprzemysłowym środowisku wewnętrznym nie przekracza $1000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.

W kabinie samochodu, która może być uznana za specyficzne środowisko wewnętrzne, całkowita zawartość LZO może być większa zarówno ze względu na znacznie mniejszą powierzchnię niż przeciętnego pomieszczenia (ale z większą liczbą detali użytych do wyposażenia wnętrza samochodu), jak i wyższą temperaturę panującą wewnątrz samochodu (bezpośrednie działanie promieni słonecznych). Fedoruk i inni [3] wykazali, że związki, takie jak: benzen, toluen, etylobenzen, ksyleny, styren, undekan i octan butylu są obecne w nowych samochodach na poziomie stężenia $1\ 076\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, a głównymi zanieczyszczeniami we wnętrzach pomieszczeń są alkilopochodne benzenu. Yoshida i inni [9] wykazali natomiast, że całkowite stężenie LZO w kabinie samochodu jest na poziomie $14\ 081\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, a głównymi zanieczyszczeniami są związki aromatyczne ($5\ 947\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) i alkany ($7\ 294\ \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Biorąc pod uwagę powyższe, różnice w oznaczonym całkowitym stężeniu LZO, niejednorodność między markami i między modelami samochodów, całkowita zawartość LZO wewnątrz pojazdów powinna być sprawdzana w ustalonych warunkach pomiaru. Określenie zawartości LZO jest szczególnie istotne, gdy bierze się pod uwagę to, że kierowca może spędzać znaczącą część dnia wewnątrz pojazdu [8, 11].

Stężenie LZO i ich charakter są ściśle związane z wyposażeniem wnętrza kabiny i rodzajem materiałów, z których zostało ono wykonane [1, 8]. Johansson [7] stwierdziła, że stężenie LZO w kabinie samochodu spada do niskich poziomów w przeciągu kilku tygodni lub miesięcy, jednak niemożliwe jest całkowite wyeliminowanie wyemitowanych związków organicznych [11]. Co więcej, stężenie różnych LZO może się zmieniać w czasie i jest zależne od temperatury panującej wewnątrz kabiny, ponieważ podwyższona temperatura powoduje zwiększoną emisję LZO z materiałów [3, 8, 10, 11]. Jednak, prawdopodobnie wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz kabiny, wzrasta nie tylko stężenie LZO, ale zmianie ulega również skład i/lub charakter chemiczny grup obecnych w mieszaninie LZO. Zabiegała [11] podaje, że oznaczenie całkowitego zanieczyszczenia

- find out the correlation between temperature increase and TVOC emission,
- find which VOCs have a significant participation in TVOC emission (in other words which VOCs are the main pollutants),
- calculate total VOC emission (expressed as toluene equivalent).

ECA recommend some analytical procedure of TVOC sampling and analyzing, but in this work some modification were made, as they allowed to obtain more precise results.

2. Methodology

The vehicle under study was one new car with 81 km of mileage with no fuel leakage. Air sample was collected from car cabin in ambient air (20 °C), without any previous car conditioning. After that, tested car was placed in environmental test chamber (length: 8.7 m; width: 7.1 m; height: 3.15 m; temperature range $-45 \div +75$ °C) with controlled temperature, set to +30 °C, +40 °C and +50 °C, and then was conditioned for 24 h in each temperature before collecting of air samples. The aim of this conditioning was to stabilize atmospheric condition inside cabin and to establish a balance of indoor air composition. The car was not ventilated before and during the tests. Additionally, the atmospheric temperature, pressure and relative humidity were controlled inside the car during sampling, as presented in Table 1. Sampling was held over the driver's seat on the height of drivers shoulder, with engine off and all doors and windows closed (static conditions). Indoor air samples were collected in each temperature onto two sorbents: Tenax TA (porous polymer sorbent) and Carbograph 1TD (graphitised carbon black sorbent) simultaneously. Carbograph 1TD was chosen as main sorbent to determine a wide range of VOCs, present in indoor air, while Tenax TA is relevant to determine semi-volatile organic compounds (SVOC) and was applied as complementary sorbent. Application of two sorbents, with different physical properties, allows to determine a wide spectrum of organic compounds present in car cabin [4]. Samples were collected with the use of SKC PCM TX-8 air sampling pumps for 20 minutes at the air flow of 100 mL/min, total volume of each collected sample was 2 000 mL/min.

All thermal desorption tubes with collected air samples were analyzed with the use of thermal desorption system Unity2 (Markes). The gas chromatographic system used was an Agilent 7890A equipped with a flame ionisation detector and coupled with mass detector (Agilent MSD 5975C). Gas chromatograph was equipped with column splitter which allowed to simultaneous analysis on both, FID and MS, detectors. All detected VOCs and total VOCs emission were calculated as toluene equivalent (TE, $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Identification of VOCs was made with the use of US NIST 08 database.

3. Results and discussion

Concentrations of individual compounds, determined in air from car cabin, in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ as TE, are presented in Table 2. In Fig. 1 the main VOCs groups concentration in car cabin in

powietrza związkami organicznymi jest bardziej użyteczne i reprezentatywne, niż oznaczanie stężeń pojedynczych związków. Jednak znajomość składu chemicznego i stężeń poszczególnych związków wchodzących w skład mieszaniny wyemitowanych LZO jest bardzo użyteczna w celu znalezienia źródła zanieczyszczenia powietrza i wyeliminowania komponentu, który powoduje główne zanieczyszczenie.

Celem niniejszej pracy było:

- sprawdzenie, czy zmiana temperatury otoczenia ma znaczący wpływ na całkowitą emisję LZO wewnątrz kabiny samochodu,
- określenie korelacji pomiędzy wzrostem temperatury a całkowitą emisją LZO,
- określenie, który LZO ma znaczący udział w całkowitej emisji (czyli, który LZO jest odpowiedzialny za główne zanieczyszczenia),
- określenie wielkości całkowitej emisji LZO (wyrażonej jako równoważnik toluenu).

ECA rekomenduje pewne procedury analityczne, które mogą być zastosowane do pobierania i analizy próbek w celu oznaczenia LZO, jednak w niniejszej pracy zastosowano pewne modyfikacje, które pozwoliły na uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników.

2. Metodyka

Badaniom poddano samochód nowy, o przebiegu 81 km, w którym nie zaobserwowano wycieku paliwa. Z wnętrza kabiny pobrano próbkę powietrza w temperaturze otoczenia (20 °C), bez wcześniejszego kondycjonowania samochodu. Następnie badany samochód umieszczono w komorze środowiskowej (długość: 8,7 m; szerokość: 7,1 m; wysokość: 3,15 m; zakres temperatur: $-45 \div +70$ °C) z kontrolowaną temperaturą i był kondycjonowany przez 24 h, przed pobieraniem próbek powietrza, w temperaturze +30 °C, +40 °C oraz +50 °C. Kondycjonowanie miało na celu stabilizację warunków atmosferycznych wewnątrz kabiny i ustalenie równowagi składu

Table 1. Atmospheric conditions inside vehicle during sampling

Tabela 1. Warunki atmosferyczne wewnątrz samochodu podczas pobierania próbek

Set temperature/ zadana tempera- tura	Indoor tempera- ture/temperatura wewnętrzna [°C]	Relative humi- dity/wilgotność względna [%]	Atmospheric pressure/ ciśnienie atmosfery- czne [hPa]
20	19.8	44.3	987.2
30	29.5	22.4	989.0
40	39.1	15.4	974.4
50	47.9	8.8	973.6

powietrza wewnątrz samochodu. Podczas pomiarów i przed nimi samochód nie był wentylowany. Dodatkowo prowadzono kontrolę temperatury powietrza, ciśnienia atmosferycznego i wilgotności względnej wewnątrz kabiny podczas pobierania próbek (tab. 1). Próbki powietrza pobierano z siedzenia kierowcy, na wysokości ramion, przy wyłączonym silniku i zamkniętych drzwiach (warunki statyczne). Próbki powietrza pobierano w każdej temperaturze równocześnie na dwa adsorbenty stałe: Tenax TA (polimer porowaty) i Carbograph 1TD (węgiel grafitowany). Adsorbent Carbograph 1TD został wybrany jako główny adsorbent, odpowiedni do oznaczania

function of temperature is presented. As main VOCs groups all groups of identified organic compounds with participation in TVOC emission over 1% are regarded. Presented data include only compounds that were present in car cabin in at least three of tested atmospheric conditions and therefore not all recommended by ECA compounds were listed.

All presented data indicates, that main air pollutants in car cabin in each temperature were compounds from group of alkanes (from 17.2% to 57.9% of TVOC emission) and aromatic hydrocarbons (from 7.4% to 17.8% of TVOC emission). The next group of pollutants were alcohols with average participation in TVOC emission at the level of 2.4% and aldehydes together with ketones, with average participation in TVOC emission at the level of 2.2%.

Total VOCs and the main VOCs concentration in air sampled from tested vehicle's cabin increased with the inside temperature increase, as presented in Fig. 2. In 50 °C total interior emission was about eleventh times higher than in 20 °C, and increased from 20 °C to 30 °C by 63.3%, from 30 °C to 40 °C by 42.7% and from 40 °C to 50 °C by 58.5%. Observed growth was exponential. In case of main VOCs the growth of emission with temperature was linear with the total growth of 77.7% with the temperature increase from 20 °C to 50 °C, and average growth of 39% in each case of temperature growth of 10 °C. Moreover, only in temperature of 20 °C main VOCs concentration was similar to TVOC concentration (79.7%) and main VOCs ratio to TVOC decreased with temperature increase. This dependence indicates, that the higher temperature inside vehicle, the more compounds with different chemical formula can be observed inside vehicle.

The most significant concentration growth with interior temperature increase was observed for alkanes. Although only slight growth of concentration was observed between 20 °C and 30 °C (from about 833 to about 966 µg/g, which means 13.8% growth), temperature increase of next 10 °C led to alkanes concentration growth of 41.2% and 42.1% with temperature increase from 40 °C to 50 °C. In case of aromatic compounds, a growth of 91.0%, from 20 °C to 50 °C, was observed. The highest growth of aromatic compounds concentration was observed with increase of temperature from 20 °C to 30 °C. In higher temperatures the concentra-

szerokiego zakresu LZO obecnych wewnątrz samochodu, podczas gdy Tenax TA był odpowiedni do oznaczania średnio-lotnych związków organicznych (SLZO) i został zastosowany jako adsorbent dodatkowy. Zastosowanie dwóch adsorbentów, o różnych właściwościach fizycznych, pozwoliło na oznaczenie szerokiego zakresu związków organicznych obecnych w kabinie samochodu [4]. Próbkę powietrza były pobierane z wykorzystaniem pompek SKC PCM TX-8 przez 20 minut z przepływem powietrza 100 mL/min (całkowita objętość pobranego powietrza wynosiła 2 000 mL/min).

Wszystkie rurki z pobranymi na adsorbenty próbkami powietrza były analizowane z wykorzystaniem systemu desorpcji termicznej Unity2 (Markes). Analizy prowadzono z wykorzystaniem chromatografu gazowego Agilent 7890A, wyposażonego w detektor płomieniowo-jonizacyjny sprzężony z detektorem mas (Agilent MSD 5975C). Chromatograf gazowy został wyposażony w splitter, który pozwolił na prowadzenie równoczesnej analizy zarówno na detektorze FID, jak i MSD. Wszystkie oznaczone lotne związki organiczne oraz całkowita emisja LZO zostały obliczone jako równoważnik toluenu (TE, µg/m³). Oznaczone LZO zostały zidentyfikowane z wykorzystaniem biblioteki US NIST 08.

3. Wyniki badań i dyskusja

Stężenia poszczególnych związków, oznaczonych w powietrzu pobranym z kabiny samochodu, w µg/m³ jako TE, przedstawiono w tabeli 2. Na rysunku 1 przedstawiono stężenia głównych grup LZO w zależności od temperatury. Za główne grupy LZO uznano wszystkie grupy zidentyfikowanych związków organicznych o udziale powyżej 1% w całkowitej emisji LZO. Przedstawione dane obejmują jedynie związki, które były obecne w kabinie samochodu w przynajmniej trzech z badanych warunków atmosferycznych, w związku z tym nie wszystkie rekomendowane przez ECA związki ujęto w zestawieniu.

Przedstawione dane wskazują, że głównymi zanieczyszczeniami organicznymi powietrza w kabinie samochodu w każdej temperaturze były alkanany (od 17,2% do 57,9% całkowitej emisji LZO) i związki aromatyczne (od 7,4% do 17,8% całkowitej emisji LZO). Kolejną grupą związków powodującą zanieczyszczenie w kabinie samochodu były alkohole, ze średnim udziałem w całkowitej emisji LZO na poziomie 2,4%, oraz aldehydy i ketony, ze średnim udziałem w całkowitej emisji LZO na poziomie 2,2%.

Całkowita emisja LZO oraz stężenie głównych lotnych związków organicznych w próbkach powietrza pobranych z kabiny badanego samochodu wzrastały wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz samochodu (rys. 2). W temperaturze 50 °C całkowita emisja wewnętrzna była około jedenastokrotnie wyższa niż w 20 °C i wzrastała wraz ze wzrostem temperatury od 20 °C do 30 °C o 63,3%, od 30 °C do 40 °C o 42,7% i od 40 °C do 50 °C o 58,5%. Obserwowany wzrost miał charakter wykładniczy. Dla głównych LZO wzrost emisji wraz ze wzrostem temperatury miał charakter liniowy i ze wzrostem temperatury z 20 °C do 50 °C wyniósł 77,7%, przy czym przeciętny wzrost emisji LZO w każdym przypadku wyniósł 39% wraz ze wzrostem temperatury o 10 °C. Ponadto tylko w temperaturze 20 °C stężenie głównych

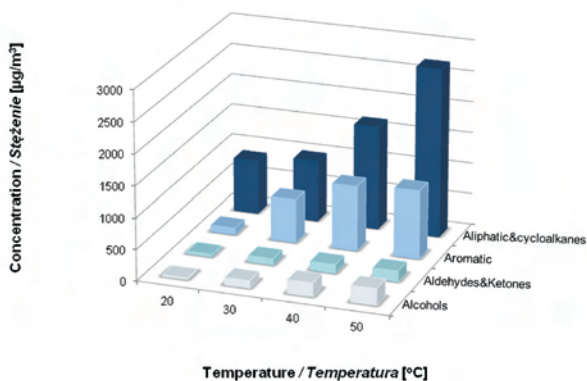


Fig. 1. Different group of VOC concentration in function of temperature
Rys. 1. Stężenie różnych grup LZO w zależności od temperatury

Table 2. List of main VOC concentration [$\mu\text{g/g}$] in car cabin in function of temperature
 Tabela 2. Wykaz stężeń głównych LZO [$\mu\text{g/g}$] w kabinie samochodu w zależności od temperatury

Compound/ związek	CAS	Temperature/temperatura [°C]				
		20	30	40	50	
Aliphatic hydrocarbons (alkanes&cycloalkanes)/ Węglowodory alifatyczne (alkany i cykloalkany)	2-methylpentane	107-83-5	145.7	24.4	34.9	13.9
	3-methylpentane	96-14-0	93.7	11.5	7.2	2.6
	Methylcyclopentane	96-37-7	145.7	9.5	5.5	4.5
	Hexane	110-54-3	212.3	21.7	15.7	7.1
	Methylcyclohexane	108-87-2	14.5	15.0	14.0	16.9
	Heptane	142-82-5	19.5	17.9	16.0	245.1
	2-methylheptane	592-27-8	3.2	1.6	3.8	481.7
	2,4-dimethylheptane	2213-23-2	1.1	51.4	167.6	330.6
	Octane	111-65-9	3.4	12.6	20.4	80.9
	4-methyloctane	2216-34-4	0.8	30.4	91.1	168.7
	2,6-dimethyloctane	2051-30-1	0.6	4.6	6.2	5.2
	Decane	124-18-5	12.1	91.5	135.1	156.7
	2-methyldecane	6975-98-0	3.8	56.8	97.1	121.9
	3-methyldecane	13151-34-3	4.0	37.1	63.4	73.3
	4-methyldecane	2980-69-0	4.1	39.3	62.5	75.6
	Undecane	1120-21-4	48.1	114.6	140.0	140.0
	2-methylundecane	7045-71-8	15.1	52.1	60.3	86.0
	3-methylundecane	1002-43-3	24.4	58.2	62.6	80.1
	4-methylundecane	2980-69-0	7.4	21.6	25.2	39.7
	Dodecane	112-40-3	58.1	191.9	387.8	430.7
Tridecane	629-50-5	9.7	32.1	68.5	95.7	
Tetradecane	629-59-4	nd(1)	8,2	20,7	22,3	
Pentadecane	629-62-9	nd(1)	8,2	25,6	29,0	
Decahydronaphthalene	91-17-8	5.6	54.2	113.1	133.3	
Total			832.8	966.4	1644.3	2841.4
Aromatic hydrocarbons/ Węglowodory aromatyczne	Toluene	108-88-3	33.3	90.9	126.4	126.0
	2-ethyltoluene	611-14-3	3.9	13.5	29.2	41.6
	Ethylbenzene	100-41-4	9.7	72.5	99.4	112.8
	Propylbenzene	103-65-1	3.0	13.2	22.6	27.9
	Xylenes	108-38-3 106-42-3 95-47-6	44.5	390.2	554.5	642.6
	(1-methylethyl) benzene	98-82-8	1.3	8.0	14.3	17.3
	(1-ethyl-3-methyl) benzene (3-ethyltoluene)	620-14-4	3.4	28.1	48.9	67.9
	1,3,5-trimethylbenzene	108-67-8	1.6	23.7	32.3	30.3
	Naphthalene	91-20-3	4.1	22.8	39.9	61.2
	Styrene	100-42-5	2.9	22.0	51.5	67.1
	α -methylstyrene	98-83-9	2.4	11.3	18.6	23.1
	Total			110.1	696.3	1037.7
Alcohols/ Alkohole	1-butanol	71-36-3	6.9	19.7	12.9	36.7
	2-ethyl-1-hexanol	104-76-7	6.0	62.1	107.5	137.9
	Phenol	108-95-2	13.8	37.1	99.2	93.1
	Total			26.7	118.8	219.6
Glycols/ Glikole	2-butoxyethanol	111-76-2	1.8	5.0	6.1	13.2
Aldehydes/ Aldehydy	Benzaldehyde	100-52-7	nd(1)	35.8	60.8	76.0
	Furfural	1998-01-01	1.4	3.8	4.4	1.9
	Total			1.4	39.6	65.2
Ketones/ Ketony	2-butanone	78-93-3	3.3	6.3	2.6	16.5
	Methylisobutylketone	108-10-1	11.8	20.5	23.1	0.0
	Cyclohexanone	108-94-1	3.0	13.5	20.6	35.4
	Acetophenone	98-86-2	22.5	26.4	35.4	45.7
	Total			40.6	66.6	81.7
Esters/ Estry	Buthylacetale	123-86-4	2.7	23.8	32.3	40.0
Sum/suma			1016	1917	3087	4556
Total VOC emission/calkowita emisja LZO			1 438	3 914	6 836	16 492
Sum/total VOC emission [%]/Suma/calkowita emisja LZO			70.7	49.0	45.2	27.6

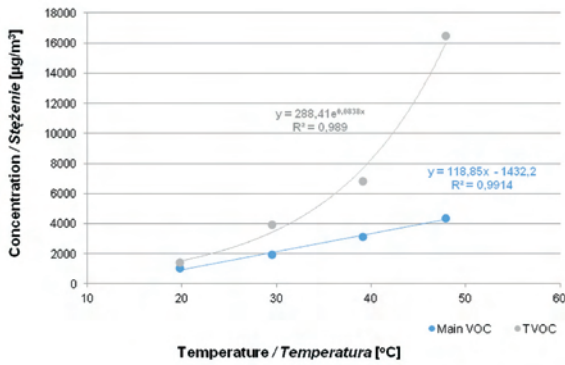


Fig. 2. Emission of TVOC and main VOC in function of temperature
Rys. 2. Emisja TVOC i głównych LZO w zależności od temperatury

tion of aromatic compounds also increased, but this growth was not so significant.

Individual compounds share in alkanes group is presented in Fig. 3. Among alkanes group, which included aliphatic hydrocarbons and cycloalkanes, the highest concentration in ambient temperature (20 °C) was observed for pentane and its isomers and hexane and its isomers. In higher temperatures this dependence changed and emission of heavier hydrocarbons (straight and branched) was observed. The percentage share of individual compounds was strongly dependent on temperature changes, and the most significant growth was observed for heptane and its isomers. As presented in Fig. 4, in case of aromatic hydrocarbons group, the most significant concentration growth was observed for xylene and its isomers, and it can be stated that those compounds are the main car cabin pollutants among aromatic compounds. Moreover, taking into account the compounds share in aromatic compounds emission, the percentage contents of individual compounds is nearly constant and do not depend on temperature changes.

To sum up, the concentrations of each chemical group of compounds inside car cabin were as follows: 833 – 2841 µg/m³ (17 – 58% of TVOC emission) for alkanes and cycloalkanes; 110 – 1218 µg/m³ (7 – 18% of TVOC emission) for aromatic hydrocarbons; 27 – 268 µg/m³ (2 – 3% of TVOC emission) for alcohols; 42 – 175 µg/m³ (1 – 3% of TVOC emission) for aldehydes and ketones. The concentration of the sum of

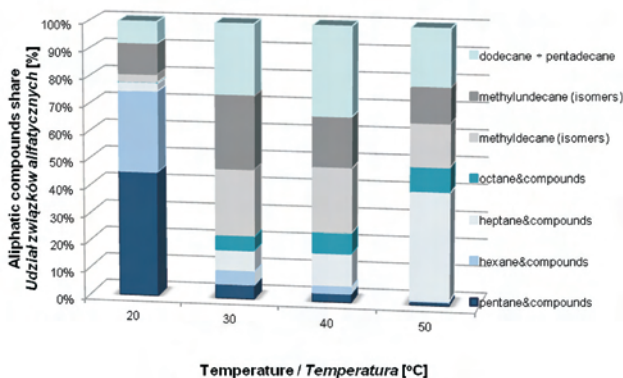


Fig. 3. Compounds share in aliphatic and cycloalkanes group
Rys. 3. Udział związków alifatycznych i cykloalkanów

LZO było zbliżone do całkowitego stężenia LZO (79,7%), w wyższych temperaturach stosunek głównych LZO do całkowitej zawartości LZO malał wraz ze wzrostem temperatury. Ta zależność wskazuje, że im wyższa temperatura panuje wewnątrz pojazdu, tym więcej jest obecnych w samochodzie związków o różnych strukturach chemicznych.

Najbardziej znaczący wzrost stężenia wraz ze wzrostem temperatury wewnątrz kabiny był obserwowany w przypadku alkanów. Pomimo że tylko niewielki wzrost stężenia związków z tej grupy zaobserwowano pomiędzy 20 °C a 30 °C (z około 833 do około 966 µg/g, co oznacza wzrost o 13,8%), wzrost temperatury o kolejne 10 °C prowadził do wzrostu stężenia alkanów o 41,2% oraz o 42,1% ze wzrostem temperatury z 40 °C do 50 °C. W przypadku związków aromatycznych zaobserwowano wzrost o 91,0% wraz ze wzrostem temperatury z 20 °C do 50 °C. Największy wzrost stężenia związków aromatycznych zaobserwowano przy wzroście temperatury z 20 °C do 30 °C. W wyższych temperaturach stężenie związków aromatycznych również rosło, jednak ten wzrost nie był znaczący.

Udział poszczególnych związków w grupie alkanów przedstawiono na rys. 3. Spośród alkanów, które obejmowały węglowodory alifatyczne i cykloalkany, największe stężenie w temperaturze otoczenia (20 °C) zaobserwowano dla pentanu i jego izomerów oraz heksanu i jego izomerów. W wyższych temperaturach ta zależność się zmieniała i wyższą emisję zaobserwowano przy występowaniu węglodorów cięższych (prosty i rozgałęzionych). Udział procentowy poszczególnych związków był silnie uzależniony od zmian temperatury, przy czym najbardziej znaczący wzrost zaobserwowano w odniesieniu do heptanu i jego izomerów. Jak to przedstawiono na rys. 4, dla związków aromatycznych najbardziej znaczący wzrost stężenia zaobserwowano dla ksylenu i jego izomerów. Można założyć, że związki te stanowią główne zanieczyszczenie powietrza wewnątrz samochodu spośród grupy związków aromatycznych. Ponadto, biorąc pod uwagę udział procentowy w emisji związków aromatycznych, zawartość poszczególnych związków jest niemal stała i nie zależy od zmian temperatury.

Podsumowując, stężenia poszczególnych grup związków wewnątrz kabiny samochodu były następujące: 833 – 2841 µg/m³ (17 – 58% całkowitej emisji LZO) dla alkanów i cykloalkanów; 110 – 1218 µg/m³ (7 – 18% całkowitej emisji LZO) dla związków aromatycznych; 27 – 268 µg/m³ (2 – 3% całkowitej emisji LZO) dla alkoholi; 42 – 175 µg/m³ (1 – 3% całkowitej emisji LZO) dla aldehydów i ketonów. Stężenie sumy wybranych alkanów i związków aromatycznych odpowiada za ponad 65% całkowitej emisji LZO w temperaturze 20 °C i niemal 25% całkowitej emisji LZO w temperaturze 50 °C.

W tabeli 3 przedstawiono możliwe efekty zdrowotne z powodu narażenia ludzi na różne LZO, które zostały wykryte w powietrzu z kabiny samochodu. Przedstawione dane zaczerpnięto z różnych kart charakterystyki substancji niebezpiecznych (Material Safety Data Sheet, MSDS) lub opracowań i raportów organizacji zdrowia i odnoszą się do czystej substancji chemicznej. Należy podkreślić, że możliwe negatywne skutki zdrowotne wyemitowanych LZO mogą się różnić, w przeciwieństwie do narażenia na substancję

selected alkanes and aromatic compounds accounted for over 65% of TVOC emission in temperature of 20 °C and nearly 25% of TVOC emission in temperature of 50 °C.

In Table 3 possible effects to human health of exposition to different VOCs, determined in air inside car cabin, is presented. Those negative influences were taken from different Material Safety Data Sheet (MSDS) or health organization reports and apply to pure chemical substance. It should be noticed that possible health effects of emitted VOCs can be probably different than in case of pure substance exposure. After all, complex mixture of emitted VOCs can lead to similar health and sensory inconvenience, especially taking into account fact, that none of detected organic compounds is without effect to human health.

Table 3. Possible health effects of exposition on VOC found in car cabin

Tabela 3. Możliwe skutki zdrowotne narażenia na LZO wykrytych w kabinie samochodu

Health effect/skutek zdrowotny	Compound/związek
eye/skin/respiratory irritation/podrażnienie oczu/skóry/dróg oddechowych	all listed in Table 2/wszystkie wymienione w tab. 2
headache, drowsiness/ból głowy, senność	1,3,5-trimethylbenzene; 1-butanol; buthyl acetate; decane; ethylbenzene; 1-ethyl-3-methylbenzene; 2-butoxyethanol; hexane; heptane; 2-butanone; methylcyclohexane; 2-methylheptane; 2-methylpentane; 3-methylpentane; naphthalene; octane; pentadecane; styrene; tetradecane; toluene
vomiting/nudności	1,3,5-trimethylbenzene; 1-ethyl-3-methylbenzene; 2-butoxyethanol; hexane; heptane; 2-butanone; naphthalene; xylenes; pentadecane; tetradecane
depression, influence on central nervous system/depresja, działanie na centralny układ nerwowy	1-butanol; buthyl acetate; 2-ethyltoluene; styrene
excitation/pobudzenie	naphthalene; xylenes
carcinogen/rakotwórczy	furfural; naphthalene
damage to organs/uszkadza organy wewnętrzne	phenol; styrene; toluene

4. Conclusions

Chemical composition of indoor air from car cabin is diversified and strongly depends on temperature inside vehicle. With temperature growth total emission of organic compounds increases and in higher temperature more heavy hydrocarbons and methyl-compounds were present in car interior.

The main five pollutants inside car cabin were:

- in temperature 20 °C: hexane, methylcyclopentane, methylpentane, dodecane and undecane,
- in temperature 30 °C: xylenes, dodecane, undecane, decane and toluene,
- in temperature 40 °C: xylenes, dodecane, 2,4-dimethylheptane, undecane and decane,
- in temperature 50 °C: xylenes, heptane, dodecane, 2,4-dimethylheptane and 2-methylheptane.

Only few compounds from group of alcohols, glycols and aldehydes/ketones were observed in car cabin in all tested atmospheric conditions.

Determination of total organic emission from car equipment give only a view of the sum of compounds concentration which are present inside car. Unfortunately, if only the sum of

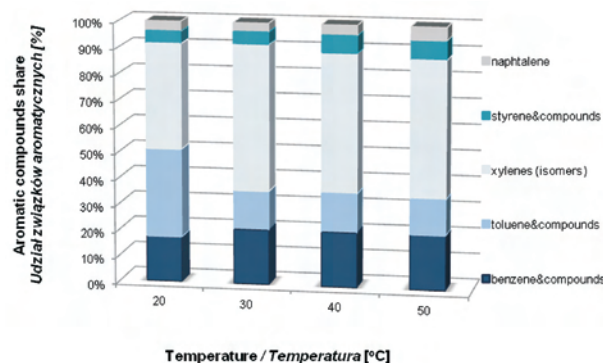


Fig. 4. Compounds share in aromatic group

Rys. 4. Udział związków aromatycznych

czystą. Pomimo tego złożona mieszanina wyemitowanych LZO może prowadzić do podobnych efektów zdrowotnych i negatywnych odczuć, szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że żaden z oznaczonych związków organicznych nie pozostaje bez wpływu na zdrowie człowieka.

4. Wnioski

Skład chemiczny powietrza wewnątrz kabiny samochodu jest zróżnicowany i silnie zależy od temperatury panującej wewnątrz samochodu. Wraz ze wzrostem temperatury całkowita emisja LZO wzrasta i w wyższych temperaturach w kabinie sa-

mochodu stwierdzono obecność większej ilości cięższych węglowodorów i metylo pochodnych węglowodorów.

Głównymi związkami organicznymi powodującymi zanieczyszczenie wnętrza kabiny były:

- w temperaturze 20 °C: heksan, metylocyklopentan, metylopentan, dodekan i undekan,
- w temperaturze 30 °C: ksyleny, dodekan, undekan, dekan i toluen,
- w temperaturze 40 °C: ksyleny, dodekan, 2,4-dimetyloheptan, undekan i dekan,
- w temperaturze 50 °C: ksyleny, heptan, dodekan, 2,4-dimetyloheptan i 2-metyloheptan.

Tylko kilka związków z grupy alkoholi, glikoli i aldehydów/ketonów zostało oznaczonych w kabinie samochodu we wszystkich badanych temperaturach.

Oznaczenie całkowitej emisji lotnych związków organicznych z wyposażenia kabiny samochodu pozwala na uzyskanie informacji jedynie na temat stężenia sumy związków, które są obecne wewnątrz kabiny. Niestety, takie podejście nie pozwala na uzyskanie informacji na temat rodzaju związków, które powodują zanieczyszczenie kabiny oraz ich stężeń. Ponadto niemożliwe może się okazać wytypowanie detalu, który jest prawdopo-

organic compounds is determined, there is no knowledge about main pollutants and their concentration. Moreover, finding a possible source of pollution (proper component which emit the most VOC) could be impossible and no preventive actions could be performed. According to these statements, it seem to be appropriate to determine and identify all organic compounds that have a significant participation in VOCs emission.

Acknowledgments

Financial support from National Centre for Research and Development (project No. N R10 0048 10) is gratefully acknowledged.

dobnym źródłem zanieczyszczenia (czyli detalu, który emituje najwięcej LZO), i w związku z tym jego wyeliminowanie jako elementu wyposażenia. Zgodnie z powyższymi danymi, celowe wydaje się oznaczenie i identyfikowanie wszystkich związków organicznych, które mają znaczący udział w emisji LZO.

Podziękowania

Badania wykonano w ramach projektu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (Projekt # N R10 0048 10).

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Chien Y.-Ch.: Variations in amounts and potential sources of volatile organic chemicals in new cars. *Science of the Total Environment* 382 (2007), p. 228-239.
- [2] ECA Report No 19: Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality investigations. Luxembourg 1997.
- [3] Fedoruk M. J., Kerger B.D.: Measurement of volatile organic compound inside automobiles. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* (2003) 13, p. 31-41.
- [4] Gołda-Kopek A., Faber J., Łomankiewicz D., Brodzik K., Nowak J., Świątek A.: Identification of in-vehicle Volatile Organic Compounds by adsorption/thermal desorption-GC/MS. *Proceedings of Air Quality – Science and Application 2012, Athens, Greece.*
- [5] Indoor air quality hazards of new car. *Air Quality Sciences, Inc.* 2006.
- [6] Indoor air quality: organic pollutants, WHO, 1989.
- [7] Johansson I.: The role of volatile organic compounds in the assessment of indoor air quality. Stockholm 1999.
- [8] Organic Indoor Air Pollutants. Occurrence, Measurement, Evaluation. 2nd edition. WILEY-VCH 2009.
- [9] Yoshida T., Matsunaga I.: A case study on identification of airborne compounds and time of a new car for private use. *Environmental International* 32 (2006), p. 58-79.
- [10] You K., Ge Y., Hu B., Ning Z., Zhao S., Zhang Y., Xie P.: Measurement of in-vehicle volatile organic compounds under static conditions. *Journal of Environmental Sciences* 19 (2007), p. 1208-1213.
- [11] Zabiegała B.: Organic compounds in indoor environments. *Polish Journal of Environmental Studies* Vol. 15, No 3 (2006), p. 383-393.

Joanna Faber, MEng. – research specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr inż. Joanna Faber – specjalista ds. badań w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: joanna.faber@bosmal.com.pl



Krzysztof Brodzik, DEng. – research-technical specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr inż. Krzysztof Brodzik – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: krzysztof.brodzik@bosmal.com.pl



Damian Łomankiewicz, MSc. – chemical laboratory manager, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr Damian Łomankiewicz – kierownik Pracowni Chemicznej, Zakład Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: damian.lomankiewicz@bosmal.com.pl



Anna Gołda-Kopek, PhD. – research-technical specialist, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr Anna Gołda-Kopek – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: anna.golda-kopek@bosmal.com.pl



Jan Nowak, MEng. – head of the Materials Testing Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Mgr inż. Jan Nowak – kierownik Zakładu Materialoznawstwa, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: jan.nowak@bosmal.com.pl



Antoni Świątek, DSc., DEng. – president and CEO, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr hab. inż. Antoni Świątek – prezes i dyrektor Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biała.

e-mail: antoni.swiatek@bosmal.com.pl



A comparison of the exhaust emission of a vehicle fuelled with different ethanol-petrol blends

Due to limited fossil fuel resources and a need to reduce anthropogenic CO₂ emissions, biofuel usage is increasing in multiple markets. Ethanol produced from the fermentation of biomass has been of interest as a potential partial replacement for petroleum for some time; for spark-ignition engines, bioethanol is the alternative fuel which is currently of greatest interest. At present, the international market for ethanol fuel consists of E85 fuel (with 85 percent ethanol content), as well as lower concentrations of ethanol in petrol for use in standard vehicles (e.g. E5, E10). The potential for reduced exhaust emissions, improved security of fuel supply and more sustainable fuel production makes work on the production and usage of ethanol and its blends an increasingly important research topic. This paper evaluates the possibility of using petrol-ethanol blends in a modern Euro 5 vehicle without substantial engine modification. The influence of different quantities of ethanol in ethanol-petrol blends (E5, E10, E25, E50 and E85) on the emission measurement of the gaseous pollutants carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), oxides of nitrogen (NO_x) and carbon dioxide (CO₂) for a passenger car were analysed over the New European Driving Cycle (NEDC) on a chassis dynamometer. The results obtained revealed that exhaust emissions are affected by the proportion of ethanol in the blend. The air:fuel ratio (λ) and exhaust temperature also varied. Increased fuel consumption was found to broadly correlate with blend energetic content for all blends. The experimental work presented in this paper was performed at BOSMAL Automotive Research and Development Institute as part of a test program evaluating biofuels' influence on light-duty petrol engines for passenger cars and light commercial vehicles.

Key words: alternative fuels, ethanol, emission, SI engines

Analiza porównawcza emisji związków szkodliwych spalin samochodu zasilanego różnymi mieszankami benzyny z etanolem

Ze względu na ograniczone zasoby paliw kopalnych oraz potrzebę zmniejszenia antropogenicznej emisji CO₂, zużycie biopaliw rośnie na wielu rynkach paliwowych. Od pewnego czasu wzrasta zainteresowanie etanolem otrzymanym przez fermentację biomasy, jako potencjalnego paliwa mogącego częściowo zastąpić benzynę w silnikach o zapłonie iskrowym. Obecnie na międzynarodowym rynku paliw dostępne są mieszanki benzyny z etanolem E85 (z 85% etanolu), a także z niższymi stężeniami (np. E5, E10), które są powszechnie stosowane do napędu standardowych pojazdów. Potencjal redukcji emisji związków szkodliwych spalin, zwiększenie bezpieczeństwa dostaw paliw i zrównoważona produkcja paliw sprawiają, że prace nad metodami produkcji i wykorzystaniem etanolu oraz jego mieszanin stają się coraz ważniejszym kierunkiem badań. Niniejszy artykuł analizuje możliwość wykorzystania mieszanek benzyny z etanolem w pojeździe spełniającym normy emisji Euro 5, bez żadnych modyfikacji silnika oraz oprogramowania (kalibracji) elektronicznej jednostki sterującej pracą silnika (ECU). Ocena wpływu mieszanek paliw, o różnych zawartościach etanolu w benzynie (E5, E10, E25, E50 i E85), na emisję gazowych zanieczyszczeń spalin, takich jak: tlenek węgla (CO), węglowodory (HC), tlenki azotu (NO_x) i dwutlenek węgla (CO₂) z samochodów osobowych została wykonana na podstawie Nowego Europejskiego Testu Jeźdźnego (NEDC) na hamowni podwoziowej. Uzyskane wyniki wskazują, że udział etanolu w mieszaninie ma wpływ na emisję związków szkodliwych spalin. Wykazano istnienie wpływu różnych mieszanek na zmianę współczynnika nadmiaru powietrza (λ) i temperaturę spalin. Dodatkowo stwierdzono zwiększone zużycie paliwa i jego korelację z gęstością energii zawartą w mieszankach benzyny z etanolem. Badania naukowe przedstawione w niniejszym artykule przeprowadzono w Instytucie Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w ramach programu badań oceny wpływu biopaliw na silniki benzynowe stosowane w lekkich samochodach osobowych i lekkich pojazdach dostawczych.

Słowa kluczowe: paliwa alternatywne, etanol, emisja, silniki ZI

1. Introduction

1.1. Bioethanol as an automotive fuel

Knowledge of the potential usage of ethanol (C₂H₆O) as a vehicular fuel dates to the conception of the automobile. Ethanol is the most widely-used biofuel, although its usage is geographically somewhat restricted. Ethanol can be pro-

1. Wprowadzenie

1.1. Bioetanol jako paliwo do napędu pojazdów

Zainteresowanie wykorzystaniem etanolu (C₂H₆O) jako paliwa samochodowego pojawiło się wraz ze skonstruowaniem pierwszych samochodów. Etanol jest najpowszechniej stosowanym biopaliwem, choć jego użycie jest nieco ograni-

duced using crude oil as a feedstock, but is more commonly sourced from conversion of biomass ('bioethanol'). Since it is derived from biomass (and not fossil hydrocarbons), bioethanol has been identified as a fuel of potential in efforts to make energy consumption in the transportation sector sustainable [1 – 3]. Bioethanol can potentially deliver life-cycle greenhouse gas savings of up to 87% over fossil fuels [3], although this value can be much lower, as it depends strongly on the feedstock and means of processing and production [3]. Currently, almost all ethanol is produced from the fermentation of edible crops.

Ethanol's properties such as density and octane number make it suitable for combustion in spark-ignition engines, for this application it is normally splash blended with petrol. Blends are identified by an 'E' followed by the volumetric percentage of ethanol in the blend; E5, E10 and E85 being common blends. The US Environmental Protection Agency (EPA) has granted a waiver for usage of the E15 blend in passenger cars from model years 2001 onwards [4]; blends up to E10 are permitted for sale in the European Union [3]. Ethanol is fully water-miscible and absorbs water; any blend containing ethanol will likely also contain a small proportion of water [2]. Ethanol has a higher density and viscosity than petrol [5, 6], is generally more penetrative through physical barriers [7] and has a lower lubricity [8]. One of the distinguishing characteristics of ethanol is that it is an oxygenated fuel, in comparison to petrol, which does not contain appreciable quantities of oxygen. Ethanol can be thought of as a partially oxidized fuel [9, 10]. The relatively low carbon: hydrogen ratio of ethanol (0.33) means that ethanol blends are an option for reducing CO₂ emissions. The addition of even relatively small proportions of ethanol to standard petrol lowers the overall C:H ratio of the fuel and makes the resulting blend more attractive.

Ethanol blends are associated with certain issues, including corrosion of various parts of the fuel storage and delivery systems [11, 12, 13], increased fuel consumption [5 – 7, 14 – 19], possible slight increases in emissions of NO_x [7, 18, 20], and increases in emissions of certain organic compounds [7, 21, 22]. Additionally, conventional aftertreatment systems are not always compatible with usage of ethanol blends. Reduced conversion efficiency and accelerated ageing have both been raised as concerns [4], particularly with higher blends.

1.2. The effect of petrol-ethanol blends on exhaust emissions

A large number of studies have indicated that combustion of ethanol and its blends can lead to reduced emissions of HC and CO, when compared to standard petrol [7, 17, 20]. Such reductions are to be expected, given ethanol's status as an oxygenate, its short chain length and its low C:H ratio. However, while ethanol is a partially oxidized fuel, it can be further oxidized without combusting completely, thereby producing aldehydes.

Emissions of NO_x have been reported to increase, decrease or remain unchanged when running on petrol-ethanol blends [7], with a majority of studies reporting a slight

change geographically. Etanol może być wytwarzany z surowca, jakim jest ropa naftowa, ale częściej pochodzi z konwersji biomasy ("bioetanol"). Bioetanol pochodzący z biomasy (a nie z kopalnych węglowodorów) jest uznawany za potencjalne paliwo wykorzystywane na rzecz zrównoważonego zużycia energii w sektorze transportowym [1 – 3]. Potencjalnie bioetanol może przyczyniać się do redukcji gazów cieplarnianych nawet o 87% w porównaniu do paliw tradycyjnych [3], chociaż wartość ta może być znacznie niższa, gdyż silnie zależy od surowca, z jakiego pochodzi bioetanol, sposobu przetwarzania oraz metody produkcji [3]. Obecnie prawie cały etanol jest otrzymywany w wyniku fermentacji produktów roślinnych.

Właściwości etanolu, takie jak gęstość i liczba oktanowa sprawiają, że nadaje się on do spalania w silnikach o zapłonie iskrowym i w tym zastosowaniu stosuje się zazwyczaj mieszanki etanolu z benzyną. Mieszanki są identyfikowane przez oznaczenie literą "E", z następującym dalem oznaczeniem procentowym objętościowej zawartości etanolu w mieszaninie: E5, E10 i E85 (najbardziej popularne oznaczenia). Amerykańska Agencja Ochrony Środowiska (EPA) przyznała ulgi za używanie mieszanek E15 w modelach samochodów osobowych od roku 2001 i późniejszych [4]; natomiast mieszanki do E10 są dopuszczone do sprzedaży na terenie Unii Europejskiej [3]. Etanol jest w pełni mieszalny z wodą i wchłania wodę, dlatego wszelkie mieszanki zawierające etanol będą prawdopodobnie również zawierać niewielkie ilości wody [2]. Etanol ma większą gęstość i lepkość niż benzyna [5, 6], ma większe zdolności przenikania przez bariery fizyczne [7] i gorsze właściwości smarne [8]. Jedną z cech wyróżniających etanol jest to, że jest paliwem utlenionym, w porównaniu do benzyny, która nie zawiera znaczącej ilości tlenu. Z tego względu etanol może być uważany za paliwo już częściowo utlenione [9, 10]. Względnie niska proporcja węgla do wodoru w etanolu (0,33) oznacza, że stosowanie mieszanek etanolu umożliwia redukcję emisji CO₂. Ponadto nawet niewielki dodatek etanolu do standardowej benzyny obniża całkowitą proporcję C:H w paliwie i sprawia, że otrzymana mieszanka staje się bardziej atrakcyjna w zastosowaniach silnikowych.

Należy wspomnieć o pewnych zagadnieniach odnoszących się do mieszanek etanolu z benzyną, a należą do nich: zwiększona korozja części w układach magazynowania i transportu paliw [11, 12, 13], zwiększone zużycie paliwa przez samochody [5 – 7, 14 – 19], możliwe nieznaczne zwiększenie emisji NO_x [7, 18, 20] oraz wzrost emisji niektórych związków organicznych [7, 21, 22]. Ponadto konwencjonalne układy oczyszczania spalin nie zawsze mogą być stosowane z mieszankami etanolu z benzyną. Wykazano, że szczególnie dla mieszanek o większej zawartości etanolu następuje przyspieszone starzenie reaktora katalitycznego (TWC) oraz obniżenie współczynnika redukcji [4].

1.2. Wpływ mieszanek benzyny z etanolem na emisję związków szkodliwych

Wiele dotychczasowych badań wykazało, że spalanie etanolu i jego mieszanek prowadzi do zmniejszenia emisji HC i CO, w porównaniu do standardowej benzyny [7, 17, 20]. Takiego obniżenia należy spodziewać się, biorąc pod

increase [7, 14 – 18], although any excess emissions are generally small [20] and may not be statistically significant in all cases [18]. The addition of oxygenates to petrol generally has a detrimental effect on NO_x emissions [20]. On the other hand, there are a number of theoretical reasons for pre-catalyst emissions of NO_x to decrease somewhat with increasing ethanol content [23]. These include more rapid combustion (due to ethanol's faster flame propagation speed, compared to petrol [6, 10, 24]), greater absorption of heat in the cylinder (due to ethanol's higher latent heat of vaporisation, compared to petrol [25]), ethanol's lower flame temperature [26] and the general leaning effect of ethanol's oxygen content [10] (around 34% higher than standard petrol). In light of these factors, any increases in exhaust emissions of NO_x under normal operating conditions may likely be a result of reduced effectiveness of the aftertreatment system (TWC), due to mixture enleanment.

The low C:H ratio of ethanol would suggest a reduction in tailpipe CO_2 . However, increased combustion efficiency leads to reduced HC and CO emissions – but increased CO_2 emissions. Additionally, the lower calorific value of ethanol generally requires increased fuelling [5 – 7, 17 – 19], thereby increasing emissions of CO_2 somewhat. The overall life-cycle CO_2 balance of the fuel depends strongly on the method of production of the ethanol [7, 19].

2. Methods

A series of tests was performed with a range of blended fuels on a modern Euro 5, unmodified passenger car. Each blend was the subject of two to three emissions tests. Since currently all petrol fuel sold in Poland contains 5% ethanol by volume (E5), this blend was used as the base fuel. The experimental work described in this paper was performed in BOSMAL's Euro 5/6 climate-controlled exhaust emissions laboratory equipped with a chassis dynamometer and a wind-speed fan, all housed within a climatic chamber (Fig. 1).

uwagę status etanolu jako dodatku tlenowego, jego krótką długość łańcucha i niską proporcję C:H. Chociaż etanol jest częściowo utlenionym paliwem, może być dalej utleniany, co w wyniku niecałkowitego spalania skutkować będzie tworzeniem się aldehydów.

W opracowaniach literaturowych wykazano, że emisja NO_x może wzrastać, spadać lub pozostawać na niezmiennym poziomie podczas zasilania silnika mieszankami benzyny i etanolu [7]. W większości wyników badań uzyskano niewielki wzrost emisji NO_x [7, 14 – 18], chociaż zwiększona emisja jest na ogół niewielka [20] i statystycznie nieistotna we wszystkich przypadkach [18]. Dodatek związków tlenowych do paliwa ma generalnie niekorzystny wpływ na emisję NO_x [20]. Jednak istnieje kilka teoretycznych powodów do obniżenia emisji NO_x przed reaktorem katalitycznym wraz ze wzrostem zawartości etanolu w benzynie [23]. Należą do nich: szybsze spalanie (ze względu na większą szybkość rozprzestrzeniania się płomienia w etanolu w porównaniu do benzyny [6, 10, 24]), większa absorpcja ciepła w cylindrze (ze względu na wyższe utajone ciepło parowania etanolu, w porównaniu do benzyny [25]), niższa temperatura płomienia [26] oraz ogólny efekt zubażania związany z zawartością tlenu w etanolu [10] (większą o ok. 34% niż dla standardowej benzyny). W świetle przedstawionych wyżej czynników, jakkolwiek wzrost emisji NO_x w gazach wylotowych, w normalnych warunkach pracy może być spowodowany zmniejszeniem skuteczności TWC, ze względu na stosowanie uboższych mieszanin.

Niska proporcja C:H w etanolu mogłaby sugerować zmniejszenie emisji CO_2 w gazach wylotowych silnika. Jednak wzrost sprawności spalania prowadzi do zmniejszenia emisji HC i CO, ale zwiększa się emisja CO_2 . Dodatkowo – niższa wartość opałowa etanolu zwykle wymaga zwiększenia dawki paliwa [5 – 7, 17 – 19], zwiększając tym samym w niewielkim stopniu emisję CO_2 . Całkowity bilans emisji CO_2 pochodzący ze spalania etanolu zależy w znacznym stopniu od sposobu jego produkcji [7, 19].



Fig. 1. Exhaust emissions laboratory at BOSMAL, showing the chassis dynamometer, windspeed fan and a vehicle, all within the climatic chamber
Rys. 1. Laboratorium emisji spalin BOSMAL – hamownia podwoziowa, wentylator oraz zamontowany samochód, umieszczonych w komorze klimatycznej

The test vehicle used for all work described here was a Euro 5 passenger car, with characteristics as shown in Table 1. The calibration of the engine control unit (ECU) was not altered in any way. Thermocouples were installed in the inlet port of the three-way catalyst (TWC) and on the emissions sampling line just downstream of the tailpipe, to obtain pre- and post-catalyst temperature data. Fuel consumption data were calculated using the carbon balance method, whose variables were modified according to the density and carbon weight fraction of the various fuel blends.

Table 1. Characteristics of the test vehicle used
Tabela 1. Parametry silnika samochodu badawczego

Ignition type/rodzaj zapłonu	Spark ignition/zapl. iskrowy
Number of cylinders/liczba cylindrów	4
Number of valves/liczba zaworów	8
Displacement/poj. silnika	Approx./ok. 1.3 dm ³
Aftertreatment System/układ oczyszczania spalin	Close-coupled/reaktor trójfunkcyjny TWC
Emissions standard/standard emisji	Euro 5

The vehicle was tested over the New European Driving Cycle (NEDC) [27] (Fig. 2). This widely-used cycle features a cold start and both urban and extra-urban driving conditions, covering a total distance of approximately 11 km. The same driving cycle was also used to pre-condition the vehicle after switching from one fuel blend to the next.

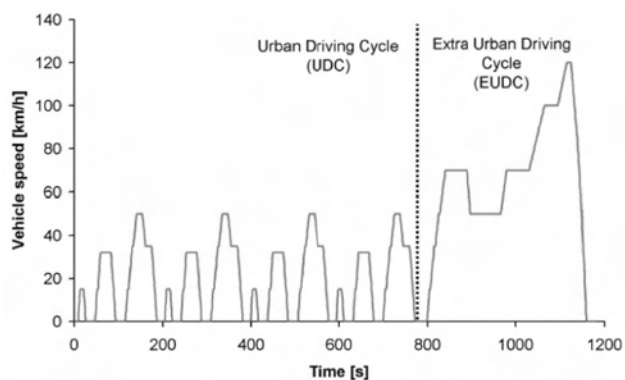


Fig. 2. The New European Driving Cycle (NEDC)
Rys. 2. Nowy Europejski Cykl Jezdny (NEDC)

3. Results

3.1. Exhaust emission

The results and discussion that follow refer to the mean value obtained from two to three tests performed on each fuel blend. All emission results are presented in comparison to the E5 blend. The results are shown graphically in the figures below as percentages.

As shown in Fig. 3, a gradual decrease in HC emissions was observed as the blend ethanol content increased from 5% to 50%. Usage of the E85 blend caused substantial excess emission of hydrocarbons during the UDC, but low

2. Metodyka badań własnych

Badania w zakresie analizy poziomu emisji związków szkodliwych w spalinach przeprowadzono na pięciu różnych mieszankach paliw na samochodzie spełniającym normy emisji Euro 5, bez zmian w kalibracji układu sterowania silnikiem (ECU). Dla każdej mieszanki wykonano od dwóch do trzech testów emisji. Ponieważ wszystkie sprzedawane benzyny na Polskim rynku zawierają 5% dodatku etanolu (E5) (objętościowo), z tego powodu paliwo to posłużyło jako paliwo referencyjne podczas badań.

Wszystkie prace eksperymentalne opisane w niniejszym artykule wykonano w laboratorium emisji spalin Euro 5/6 Zakładu Badań Silników IBiRM BOSMAL, które umożliwia wykonywanie kompleksowej analizy emisji związków szkodliwych i toksycznych w spalinach samochodowych w kontrolowanych warunkach otoczenia (wilgotność, temperatura). Laboratorium wyposażone jest w komorę klimatyczną, wewnątrz której znajduje się jednorolkowa hamownia podwoziowa oraz wentylator symulujący prędkość wiatru w czasie jazdy samochodu podczas testu emisji (rys. 1).

Wszystkie przeprowadzone i opisane w niniejszym artykule badania wykonano na samochodzie osobowym spełniającym wymagania norm emisji Euro 5, którego dane przedstawiono w tabeli 1. Kalibracja elektronicznego modułu sterującego pracą silnika (ECU) nie była w żaden sposób modyfikowana.

Czujniki temperatur zamontowano w układzie wylotowym silnika w miejscu wlotu do reaktora katalitycznego (pomiar spalin surowych z silnika) oraz w miejscu wylotu z reaktora (rura wylotowa samochodu), w celu uzyskania wartości temperatur przed i za reaktorem TWC. Zużycie paliwa było obliczone metodą bilansu węgla, którego zmienne były modyfikowane w zależności od gęstości i wagowego udziału węgla w różnych mieszankach benzyny z etanolem.

Badania wykonano na podstawie testu jezdnyego NEDC [27] (rys. 2). Test ten obejmuje zimny rozruch silnika oraz cykl jazdy w warunkach miejskich i pozamiejskich o łącznym dystansie około 11 km. Ten sam test jezdny wykorzystywany był w celu kondycjonowania pojazdu i układu zasilania po zmianie mieszanki paliwa na kolejną.

3. Wyniki badań

3.1. Emisja związków szkodliwych spalin

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki odnoszą się do wartości średniej uzyskanej z dwóch lub trzech testów emisji wykonanych na każdej mieszance paliw. Wszystkie prezentowane wyniki są porównywane do mieszanki E5. Procentowe wyniki przedstawiono graficznie na rysunkach poniżej.

Jak pokazano na rysunku 3, stopniowy spadek emisji HC zaobserwowano dla mieszanek o zawartości etanolu wzrastającej z 5% do 50%. Zastosowanie mieszanki E85 spowodowało z jednej strony znaczny wzrost emisji węglowodorów w fazie UDC, ale z drugiej strony niski poziom emisji w fazie EUDC. W całym teście NEDC mieszanki E10, E25 i E50 wykazały tendencję do obniżenia emisji HC w porównaniu ze standardowym paliwem E5.

emissions during the extra-urban phase (EUDC). Over the entire NEDC, ethanol blends E10, E25 and E50 produced lower HC emissions than the standard E5 blend.

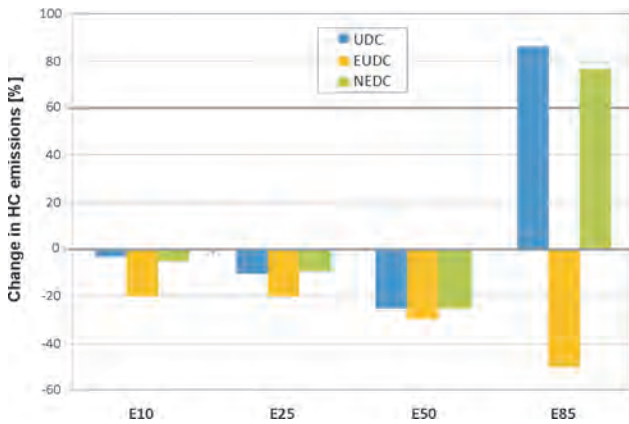


Fig. 3. Change in HC emissions for blends E10-E85 over the NEDC in comparison to the E5 blend

Rys. 3. Zmiana emisji HC w teście NEDC dla mieszanek E10-E85 w porównaniu z mieszanką E5

Poziom emisji drugiego z głównych produktów niezupełnego spalania, tlenku węgla (CO), był na ogół niższy dla mieszanek E10, E25 i E50 (rys. 4). Wyjątkiem były dwa

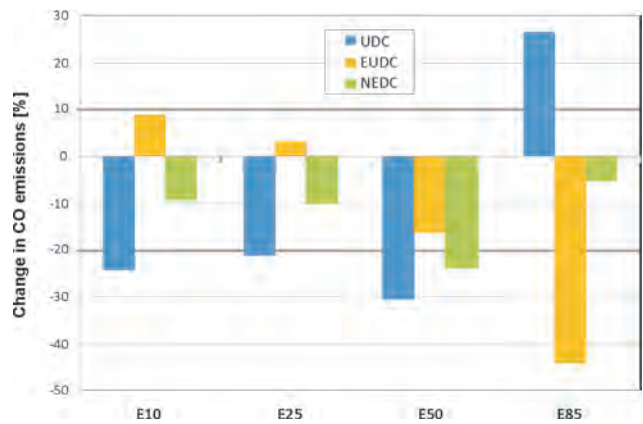


Fig. 4. Change in CO emissions for blends E10-E85 over the NEDC in comparison to blend E5

Rys. 4. Zmiana emisji CO w teście NEDC dla mieszanek E10-E85 w porównaniu do mieszanki E5

Emissions of the other main product of partial combustion, carbon monoxide, were generally lower for ethanol blends E10-E50 (Fig. 4), with two exceptions during the EUDC for blends E10 and E25. The E85 blend was observed to cause higher emissions than E5 during the UDC, but much lower emissions during the EUDC. Significantly, over the entire NEDC, all blends tested outperformed the standard E5 blend in terms of CO emission, with E50 offering the most substantial reduction.

Emissions of NO_x , shown in Fig. 5, were observed to be similar for blends E10 and E25, with both outperforming E5 during the UDC, and the NEDC. Blends E50 and E85 caused higher emissions, particularly during the EUDC. A rapid increase of NO_x emission during the EUDC was observed for increasing blend ethanol content. Over the NEDC, results revealed a monotonic increase in NO_x emissions over the range 10% to 85% ethanol content.

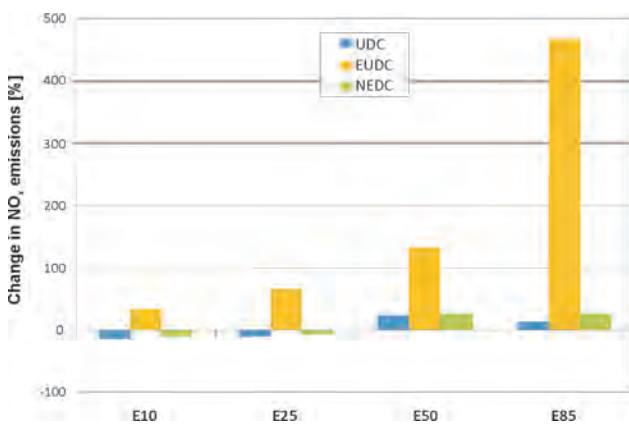


Fig. 5. Change in NO_x emissions for blends E10-E85 over the NEDC in comparison to blend E5

Rys. 5. Zmiana emisji NO_x w teście NEDC dla mieszanek E10-E85 w porównaniu do mieszanki E5

przypadki uzyskane w fazie EUDC dla mieszanek E10 i E25. Dla mieszanki E85 zaobserwowano zwiększenie emisji w porównaniu do mieszanki E5 podczas fazy UDC, ale znacznie niższą emisję podczas fazy EUDC. W całym teście NEDC, na wszystkich testowanych mieszankach, uzyskano lepsze wyniki pod względem emisji CO w porównaniu do standardowej mieszanki E5. Ponadto na mieszance E50 uzyskano znaczące zmniejszenie emisji CO.

Uzyskane wyniki emisji NO_x przedstawiono na rysunku 5. Poziom emisji dla mieszanek E10 i E25 był podobny; obie mieszanki w porównaniu do paliwa odniesienia E5 wykazują niższą emisję w fazie UDC i w teście NEDC. Dla mieszanek E50 i E85 zaobserwowano wzrost emisji NO_x , szczególnie podczas fazy EUDC. Szybki wzrost emisji NO_x w fazie EUDC obserwowano wraz ze zwiększeniem zawartości etanolu w mieszaninie. Podczas testu NEDC, otrzymane

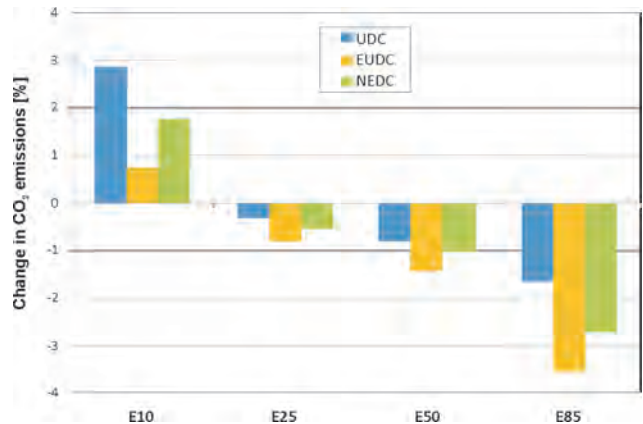


Fig. 6. Change in CO_2 emissions for blends E10-E85 over the NEDC in comparison to blend E5

Rys. 6. Zmiana emisji CO_2 w teście NEDC dla mieszanek E10-E85 w porównaniu do mieszanki E5

The CO₂ emissions response showed relatively little variation from one blend to the next, as shown in Fig. 6. During both phases, CO₂ emissions showed a slight increase for the E10 blend, compared to E5. Over the range 10 – 85% ethanol content, a very gradual downwards trend was observed for both phases of the test cycle. The only blend containing more ethanol than petrol – E85 – emitted approximately 2.7% less CO₂ over the entire NEDC than the E5 blend. Mean results for blends E10, E25 and E50 were all within 2% of the mean result for the E5 blend.

3.2. Fuel consumption

Calculated fuel consumption over the entire NEDC increased for blends E10, E25, E50 and E85, when compared to E5 (Fig. 7), which appears simply to be a reflection of

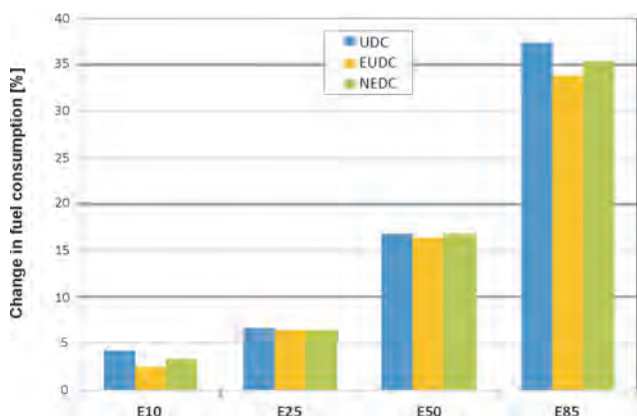


Fig. 7. Change in fuel consumption for blends E10-E85 over the NEDC in comparison to blend E5

Rys.7. Zmiana zużycia paliwa w teście NEDC dla mieszanek E10-E85 w porównaniu do mieszanki E5

the reduced energetic content of ethanol compared to petrol. Consumption of the E85 blended fuel appeared to have increased further than could be accounted for by the lower energetic content of this blend.

The lower energetic content of ethanol compared to petrol is an inherent disadvantage of ethanol as a fuel. However, the high anti-knock index (AKI) of ethanol permits the use of higher compression ratios, which could compensate somewhat for the reduced energetic content of mid-to-high ethanol blends [28]. Such a strategy would, however, require modifications to both the engine and the TWC.

3.3. Air fuel ratio (λ)

The air:fuel ratio (λ) was found to vary with the blend, as shown in Fig. 8. For blends E5, E10 and E25 the percentage of time spent in lean operation ($\lambda > 1$) did not vary significantly, with a values in the range 35% to 39%; the E50 blend caused the engine to operate lean some 53% of the time. The E85 blend caused lean operation during 81% of the NEDC, with lean conditions occurring under a variety of driving conditions.

wyniki charakteryzowały się monotonicznym wzrostem emisji NO_x w przedziale zawartości alkoholu etylowego od 10% do 85%.

Uzyskane wyniki emisji CO₂ wykazały stosunkowo niewielki wpływ zawartości etanolu na emisję tego związku, co przedstawiono na rys. 6. Podczas obu faz (UDC i EUDC) emisja CO₂ nieznacznie wzrosła dla mieszanki E10, w porównaniu do E5. W zakresie zmiany zawartości etanolu od 10% do 85% zaobserwowano bardzo stopniowy spadek emisji CO₂ w obu fazach testu. Dla mieszanki zawierającej więcej etanolu niż benzyny (E85) emisja była około 2,7% mniejsza w całym teście NEDC w porównaniu do mieszanki referencyjnej E5. Średnie wyniki dla mieszanek E10, E25 i E50 były w granicach 2% średniego wyniku dla mieszanki E5.

3.2. Zużycie paliwa

Obliczone zużycie paliwa w całym teście NEDC wzrosło dla mieszanek E10, E25, E50 i E85, w porównaniu do mieszaniny E5 (rys. 7), co wynika ze zmniejszonej wartości opałowej tych mieszanin w porównaniu do benzyny. Zużycie paliwa uzyskane na mieszance E85 wzrosło bardziej niż się spodziewano, w odniesieniu do jej niższej wartości opałowej.

Niższa zawartość energetyczna etanolu w porównaniu do benzyny jest jego wadą w kontekście zastosowania etanolu jako paliwa do napędu pojazdów. Jednak wysoki indeks przeciwstukowy (AKI) etanolu pozwala na użycie wysokich stopni sprężania, co może rekompensować nieco obniżoną zawartość energetyczną mieszanek o średniej i dużej zawartości etanolu w mieszaninie [28], ale taka strategia wymaga modyfikacji zarówno silnika, jak i zastosowania specjalnego reaktora katalitycznego.

3.3. Współczynnik nadmiaru powietrza (λ)

Podczas przeprowadzonych badań stwierdzono różnice w wartościach współczynnika nadmiaru powietrza w zależności od składu mieszanki, co przedstawiono na rysunku 8. Dla mieszanek E5, E10 i E25 procent czasu pracy silnika na mieszance ubogiej ($\lambda > 1$) nie różnił się

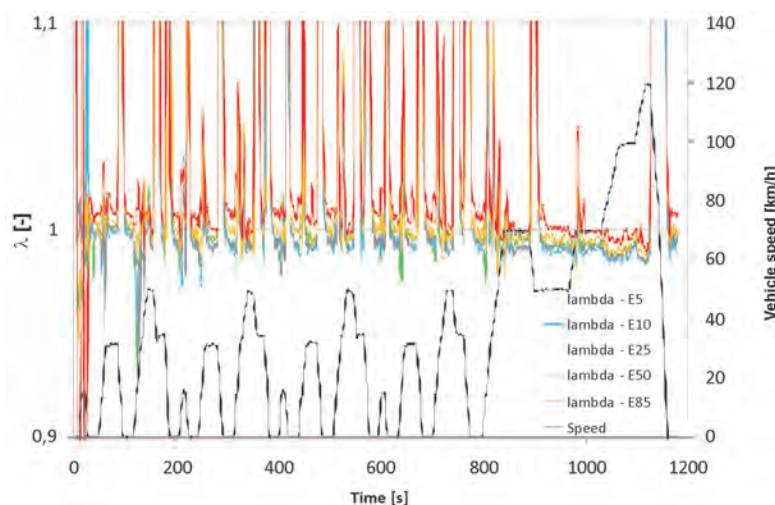


Fig. 8. Lambda values within the range 0.9 – 1.1 for all blends tested

Rys. 8. Wartość współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie 0,9 – 1,1 dla wszystkich testowanych mieszanek

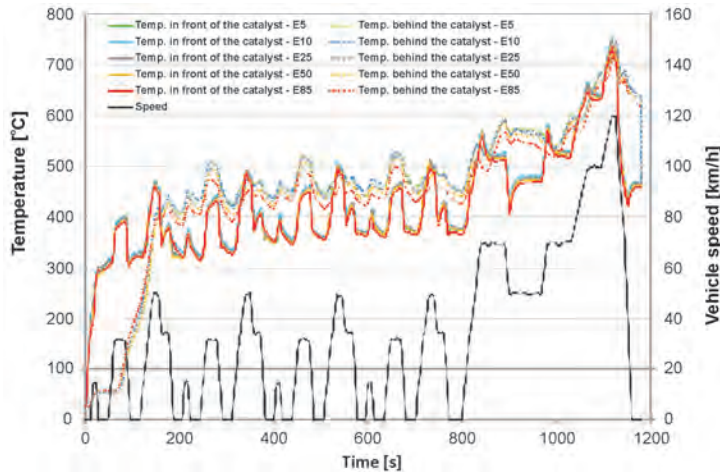


Fig. 9. Pre- and post-catalyst temperature traces over the NEDC for blends E5-E85

Rys. 9. Zmiany temperatury przed i za reaktorem katalitycznym w teście NEDC dla mieszanin benzyny z etanolem E5–E85

3.4. Exhaust temperature

Pre-catalyst temperature data were also found to vary according to the blend in use, as shown in Fig. 9. The lowest engine out temperatures were observed when the vehicle was running on the E85 blend.

4. Discussion

Exhaust emissions from blends E10 and E25 were generally acceptable. The E50 and E85 blends showed excess NO_x emissions, while the E85 blend was also problematic in terms of startup and exhaust emissions of HC. The reduction in tailpipe emissions of NO_x for blends E10 and E25 is significant, and is in agreement with some other studies [7, 9]. The high oxygen content of blends E50 and E85, and the lean operation this caused, was probably a contributing factor to high NO_x emissions from these blends, as the TWC's NO_x reduction efficiency would have been lower. The standard engine calibration used in the unmodified vehicle was evidently not suitable for these higher blends, E85 in particular. Other effects, such as problems with fuel delivery, may also have contributed. A general trend in emission results was that the emissions response to increasing blend ethanol content is not always linear. For a particular pollutant, an optimum level of ethanol content may exist – and emissions will be higher both above and below this point, as was the case for emissions of HC, CO and NO_x over the NEDC. The change in TWC light-off temperature for HC, CO or NO_x varies both with the precious metal, and the blend's ethanol content [30]. Increased ethanol content appears to raise light-off temperatures in many cases [30]. Non-linearity in tailpipe emissions responses may be due to a complex trade-off between lower engine out emissions, slight delays in reaching TWC light-off temperature, and variations in the effectiveness of the TWC in response to the chemistry of the exhaust gas. As the TWC fitted to the vehicle used in this study was not designed for use with ethanol blends, it is not unexpected that higher ethanol blends were observed to cause emissions excesses [9]. The observed increase in fuel consumption, occurring

znacznie i zawierał się w zakresie od 35% do 39% czasu trwania testu NEDC; na mieszance E50 czas ten wynosił około 53%. Dla mieszanki E85 praca silnika na mieszance ubogiej stanowiła 81% czasu trwania testu NEDC, również zakres pracy silnika cechowała różnorodność warunków występowania takiej mieszanki.

3.4. Przebiegi temperatur spalin

Stwierdzono wyraźne różnice w przebiegu zmian temperatur przed reaktorem katalitycznym w zależności od mieszanki użytej do badań (rys. 9). Najniższe wartości temperatur spalin zmierzono podczas pracy silnika na mieszance E85.

4. Analiza wyników badań

Emisja związków szkodliwych spalin przy zastosowaniu mieszanek E10 i E25 kształtowała się na akceptowalnym poziomie nieodbiegającym od emisji uzyskanej przy stosowaniu paliwa odniesienia (E5).

Wyższy poziom emisji NO_x uzyskano na mieszance E50 i E85, natomiast na mieszance E85 zaobserwowano również problemy w rozruchu silnika oraz wzrost emisji HC. Obniżenie emisji NO_x dla mieszanek E10 i E25 jest znaczne i zgodne z innymi badaniami eksperymentalnymi [7, 9]. Duża zawartości tlenu w mieszankach paliwa E50 i E85, prowadząca do pracy silnika w zakresie mieszanki ubogiej, była prawdopodobnie w tych przypadkach przyczyną wysokiej emisji NO_x oraz obniżonej sprawności redukcji tlenków azotu w reaktorze katalitycznym. Standardowa kalibracja ECU silnika, w którą był wyposażony badany samochód, jednoznacznie okazała się niewłaściwą w zastosowaniu z mieszankami o dużej zawartości etanolu, szczególnie mieszanki E85. Inne problemy, takie jak np. z układem zasilania mogą również przyczyniać się do zwiększonej emisji NO_x . Ogólną tendencją zaobserwowaną podczas badań jest zmieniająca się nieliniowo emisja związków szkodliwych wraz ze wzrostem zawartości etanolu w mieszance. W przypadku emisji HC, CO i NO_x podczas testu NEDC istnieje optymalny poziom zawartości etanolu, dla którego emisja kształtuje się powyżej oraz poniżej tego optimum. Zmiana temperatury „light-off” TWC dla HC, CO i NO_x zależy zarówno od metali szlachetnych zastosowanych w reaktorze, jak i od zawartości etanolu w mieszance [30]. Większa zawartość etanolu, w wielu przypadkach, powoduje wzrost temperatury „light-off” reaktora katalitycznego [30]. Nieliniowe zachowanie emisji związków szkodliwych może być spowodowane złożonym kompromisem pomiędzy niższą emisją gazów wylotowych z silnika, niewielkim opóźnieniem w uzyskaniu temperatury „light-off” w TWC i zmianą skuteczności odpowiedzi TWC na skład chemiczny spalin. Używany reaktor katalityczny w badanym pojeździe nie został zaprojektowany do stosowania z paliwami z dodatkiem etanolu, dlatego nie jest zaskoczeniem, że dla mieszanek z większą zawartością etanolu zaobserwowano nadmierną emisję [9]. Liniowy wzrost zużycia paliwa dowiódł, że istnieje wpływ mniejszej zawartości energetycznej etanolu na ten parametr i ma on duże znaczenie.

as a response to the lower energetic content of ethanol, is of significance.

5. Conclusions and summary

The results presented above underline the viability of using low petrol-ethanol blends in modern passenger cars, as far as regulated exhaust emissions are concerned. Tailpipe emission data presented here suggest that modest improvements in air quality would result from usage of low-to-mid ethanol blends in the vehicle tested. In consideration of the results and analyses presented above, it has been possible to determine that the unmodified Euro 5 vehicle used in this study could be operated on various petrol-ethanol blends, from E5 to E50, but E85 performed very poorly – cold start was problematic, the mixture was generally very lean, fuel consumption was high, and emissions of HC and NO_x were substantially higher. In order to better understand the processes and effects leading to changes in emission levels when running on higher petrol-ethanol blends, it would be advantageous to conduct tests on a vehicle with an altered calibration tailored towards usage of richer ethanol-petrol blends. While ethanol shows promise as a potential candidate for partial replacement of fossil fuels, this study has highlighted the continued need for further detailed research into the emissions costs and benefits of using blends higher than E5 in unmodified vehicles. Blends E10 and E25 have been shown to perform well on the vehicle tested in this study. While this study has focused on exhaust emissions and fuel consumption, further work on reliability, component durability and aftertreatment system compatibility is required. In order to have sufficient information to make sound engineering, commercial and political decisions, wide-ranging test programmes on low-to-mid ethanol blends in standard passenger cars are required.

Acknowledgment

Support for this research project was provided by the Polish Ministry of Science and Higher Education from research funds 2010-2012: Grant N N509 494838

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Nomenclature/Skróty i oznaczenia

λ	Lambda/współczynnik nadmiaru powietrza
CO	Carbon monoxide/tlenek węgla
CO ₂	Carbon dioxide/dwutlenek węgla
E5	Fuel blend with 5% ethanol content/mieszanka paliwa z 5-procentową zawartością etanolu
ECU	Engine Control Unit/Elektroniczna Jednostka Sterująca
Ex	Fuel blend with x % ethanol content/mieszanka paliwa z x% zawartością etanolu
EUDC	Extra Urban Driving Cycle/Pozamiejski Cykl Jezdny
HC	Hydrocarbons/węglowodory
MON	Motor octane number/motorowa liczba oktanowa

5. Wnioski i podsumowanie

Przedstawione wyżej wyniki potwierdzają możliwość stosowania mieszanek o małej zawartości etanolu w benzynie, w nowoczesnych pojazdach, pod warunkiem spełnienia limitów emisji spalin. Uzyskane wyniki pokazują umiarkowaną obniżkę zawartości związków szkodliwych w spalinach przy zastosowaniu niskich i średnich stężeń etanolu w mieszkankach z benzyną, w badanym samochodzie. Na podstawie uzyskanych wyników i przedstawionej analizy udało się ustalić, że pojazd spełniający normy emisji Euro 5, przy jednoczesnym braku ingerencji w kalibrację elektronicznej jednostki sterującej pracą silnika, może być zasilany mieszkankami o różnej zawartości etanolu w mieszaninie, od E5 do E50, ale dla mieszaniny E85 osiągi silnika są gorsze – pojawiają się problemy z rozruchem silnika na zimno, występuje spalanie mieszanek ubogich, wzrasta zużycie paliwa oraz znacznie wzrasta emisja HC i NO_x. W celu lepszego zrozumienia procesów i efektów zmian poziomu emisji podczas pracy na mieszkankach o większej zawartości etanolu w benzynie, korzystne byłoby przeprowadzenie testów w pojeździe wyposażonym w silnik o zmodyfikowanej kalibracji, dostosowanej do mieszanek bogatszych w etanol. Choć etanol wykazuje pozytywne cechy w zastosowaniu jako paliwo silnikowe, częściowo mogące zastąpić obecnie stosowane paliwa kopalne, badania wykazały potrzebę dalszych, szczegółowych prac nad kosztami obniżenia emisji i korzyściami wynikającymi z zastosowania mieszanek innych niż E5 w pojeździe wyposażonym w standardową kalibrację ECU. Badania na mieszkankach E10 i E25 wykazały, że mieszanki te charakteryzują się dobrymi właściwościami i osiągnięciami uzyskanymi na badanym pojeździe. Przeprowadzone badania koncentrowały się na określeniu emisji składników toksycznych spalin i zużyciu paliwa, ale niezbędne są dalsze prace nad niezawodnością, trwałością i zgodnością układów oczyszczania spalin montowanych w układach wylotowych pojazdów. W celu uzyskania wystarczających informacji dla podjęcia właściwych inżynierskich, handlowych i politycznych decyzji wymagane są obszernie programy badawcze na temat zastosowania mieszanek o niskiej i średniej zawartości etanolu do standardowych samochodów osobowych.

Podziękowanie

Badania zostały wykonane w ramach projektu badawczego nr NN 509 494838 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na lata 2010-2012.

NEDC	New European Driving Cycle/Nowy Europejski Test Jezdny
NO _x	Oxides of nitrogen/tlenki azotu
RON	Research octane number/badawcza liczba oktanowa
ZI	Spark ignition/zapłon iskrowy
TWC	Three-way catalyst/trójfunkcyjny reaktor katalityczny
UDC	Urban Driving Cycle/Miejski Cykl Jezdny
v	Volume/objętość
ϵ	Compression ratio/stopień kompresji

Bibliography/Literatura

- [1] Goldemberg J.: Ethanol for a Sustainable Energy Future. *Science*, 315, 5813, 808-810, 2007.
- [2] Demirbas A.: Emission Characteristics of Gasohol and Diesel. *Energy Sources, Part A*, 31, 1099-1104, 2009.
- [3] Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009. *Official Journal of the European Union*, 5.6.2009, L140, 88-113.
- [4] Partial Grant and Partial Denial of Clean Air Act Waiver Application. EPA document EPA-HQ-OAR-2009-0211, 2011.
- [5] Eyidogan M. et al.: Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the performance and combustion characteristics of an SI engine. *Fuel*, 89, 2713-2720, 2010.
- [6] Negurescu N. et al.: Aspects of Using Ethanol in SI Engines. FISITA paper F2006P294, 2006.
- [7] Niven R.K.: Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 535-555, 2005.
- [8] Intensive Field Trial of Ethanol/Petrol Blend in Vehicles, Energy Research & Development Corporation Project No. 2511, 1998.
- [9] Bielaczyc P., Szczotka A., Wojnarowicz M.: The alternative fuels powertrain technology evolution. Polish Society of Combustion Engines paper PTNSS-2009-SC-162, 2009.
- [10] Bayraktar H.: Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy*, 30, 1733-1747, 2005.
- [11] Ertekin A., Sridhar N.: Performance of Elastomeric Materials in Gasoline - Ethanol Blends - A Review. NACE 2009 Corrosion Conference and Expo, 2009.
- [12] Ambrozina A.R.P., Kuri S.E.: Corrosão Metálica Associada ao Uso de Combustíveis Minerais e Biocombustíveis. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 7, 1910-1916, 2009.
- [13] Technical Assessment of the Feasibility of Introducing E15 Blended Fuel in U.S. Vehicle Fleet, 1994 to 2000 Model Years. Ricardo project FE405, 2010.
- [14] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J.: The Impact of Different Petrol-Ethanol Blends on the Exhaust Emissions from a Modern Light-Duty Petrol Engine. EAEC2011_0194, 13th EAEC European Automotive Congress, Valencia 2011.
- [15] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J.: The Effect of Various Petrol-ethanol Blends on Exhaust Emissions and Fuel Consumption of an Unmodified Light-Duty SI Vehicle. SAE Paper 2011-24-0177, ICE2011 - 10th International Conference on Engines & Vehicles, Naples 2011.
- [16] Bielaczyc P., Szczotka A., Woodburn J.: A Study of Gasoline-Ethanol Blends Influence on Performance and Exhaust Emissions from a Light-Duty Gasoline Engine. SAE Paper 2012-01-1052, SAE 2012 World Congress, Detroit, USA 2012.
- [17] Bergstrom, K., Jones, C. The New Ecotech Turbo Biopower Engine from GM Powertrain. EAEC paper, 2009.
- [18] Durbin T.D. et al.: Effects of Ethanol and Volatility Parameters on Exhaust Emissions. CRC Project No. E-67, 2006.
- [19] Dias de Oliveira M.E. et al.: Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint. *Bioscience*, Vol. 55 No. 7, 2005.
- [20] Hochhauser A.M.: Review of Prior Studies of Fuel Effects on Vehicle Emissions. SAE paper 2009-01-1181, 2009.
- [21] Naidenko O.V.: Ethanol-Gasoline Fuel Blends May Cause Human Health Risks and Engine Issues. Environmental Working Group Review, 2009.
- [22] Graham L.A. et al.: Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. *Atmospheric Environment*, 42, 4498-4516, 2008.
- [23] Review of fuel ethanol impacts on local air quality. Bioethanol for Sustainable Transport report No. D9.14, 2008.
- [24] Yusaf T. et al.: Theoretical and experimental investigation of SI engine performance and exhaust emissions using ethanol-gasoline blended fuels. 3rd International Conference on Energy and Environment (ICEE2009), 7-8 December 2009, Malacca, Malaysia.
- [25] Agarwal A.K.: Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 233-271, 2007.
- [26] Parag S. et al.: Emissions from ethanol blended fossil fuel flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35:1, 96-104, 2011.
- [27] Directive 98/69/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998. 1998L0069, 1998.
- [28] Turner J.W.G. et al.: Alcohol-Based Fuels in High Performance Engines. SAE paper 2007-01-0056, 2007.
- [29] Roberts M.C.: E85 and fuel efficiency: An empirical analysis of 2007 EPA test data. *Energy Policy*, Vol. 36, Issue 3, 1233-1235, 2008.
- [30] Maununa T., Kinninen T.: Effect of oxygen containing biofuels on the emissions with exhaust gas catalysts. SAE paper 2009-01-2737, 2009.

Piotr Bielaczyc, DEng. – head of the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Piotr Bielaczyc – kierownik Zakładu Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.bielaczyc@bosmal.com.pl



Dariusz Klimkiewicz, DEng. – doctor in the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Dariusz Klimkiewicz – adiunkt w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: dariusz.klimkiewicz@bosmal.com.pl



Andrzej Szczotka, DEng. – doctor in Engine Research Department at the BOSMAL Automotive Research & Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Andrzej Szczotka – adiunkt w Zakładzie Badań Silników Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: andrzej.szczotka@bosmal.com.pl



Joseph Woodburn, MSc. – researcher at the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Mgr inż. Joseph Woodburn – inżynier ds. badań w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.



Jorma KESKINEN

Topi RÖNKKÖ

Panu KARJALAINEN

Matti HAPPONEN

Piotr BIELACZYC

Rafal SALA

Jakub DZIDA

Toni KINNUNEN

Pekka MATILAINEN

Maria E. MESSING

An evaluation of particle oxidation catalyst (POC) performance and a study of particle formation for sulphur containing diesel fuels

This paper describes and analyses the overall impact of fuel sulphur content on particulate oxidation catalyst (POC) performance, focusing mainly on particulates emission reduction and the ability to regenerate. Studies were carried out for diesel fuels containing different levels of sulphur, covering the range from 6 to 340 parts per million. The results presented in this paper give an outlook on specific issues and problems associated with POC application when running on fuels containing high sulphur level. The test methodology was experimentally established and then applied for POC catalysts to run on different sulphur level fuels. Each fuel was tested on an identical fresh POC sample. It was observed that the Fuel Sulphur Content (FSC) significantly affects catalyst conversion efficiency, as well as the particle size distribution. It also has a remarkable influence on particulate matter (PM) mass accumulation inside the POC and on the ability of the POC to regenerate passively. Regarding the latter aspect, NO₂ formation was also determined. Extended test results and analyses presented in this paper are presented in SAE technical paper 2012-01-0366 [1].

Key words: particle oxidation catalyst (POC), fuel sulphur content, particulate matter reduction, regeneration

1. Introduction

Particulate matter emitted from internal combustion engines can affect human health [2 – 6] and the environment by interfering with the climate and ecosystems. Among others, the particulate matter (PM) present in diesel exhaust is of special concern because, due to their respirable size, the particles can penetrate deep into human lungs, affecting health; see e.g. [7 – 9]. Moreover, vehicular particle emissions are generated in our immediate environment, meaning that millions of people are exposed to these emissions on a daily basis. However, the harmful characteristics and affecting mechanisms of these pollutants are unclear.

PM emitted in diesel exhaust is a complex mixture of carbonaceous soot, unburned fuel and lubricating oil, and perhaps the products of fuel pyrolysis reactions. Particulate matter can be both solid and liquid; typically PM includes four fractions of diesel particulates: (1) solid soot, (2) SOF (soluble organic fraction; heavy hydrocarbons), (3) sulphur compounds and (4) ash. For modern engines, sulphur content is one of the fuel properties which has the greatest influence on particulates [10, 13]. Particulate emissions of diesel engine exhaust are a function of a number of parameters, including: engine type, engine operating conditions, and fuel and lubricant oil composition [10]. The size distribution of submicron diesel exhaust particles can typically be divided into two separate modes called the *accumulation mode* (AM) and the *nucleation mode* (NM) [15]. The accumulation mode consists of solid agglomerated soot particles which can bear volatile or semivolatile components (e.g. sulphur compounds, water, hydrocarbons) on their surfaces [15]. Nucleation mode particles have been commonly

reported to consist of water, sulphuric acid and hydrocarbons. Several studies have indicated that nucleation mode particles are semi-volatile and that formation of the particles occurs when the exhaust gas is cooled and diluted in the atmosphere [11, 16, 17]. Other studies have also indicated that the sulphur from fuel and lubricant oil have a driving role in the particle formation process. However, some recent studies [18, 19] have indicated that nucleation mode particle formation can also take place without the sulphur driven process, so that the nuclei of nucleation mode particles are already formed under high temperature conditions.

Diesel vehicles are typically equipped with an exhaust aftertreatment system consisting of a diesel oxidation catalyst (DOC) and/or a diesel particle filter (DPF). The oxidising DOC can affect the semivolatile exhaust particle fraction both through hydrocarbon oxidation and because it usually promotes the conversion of SO₂ to SO₃. SO₃ reacts with water molecules, forming sulphuric acid. Furthermore, based on modelling studies [20, 21], the sulphuric acid and water can nucleate when the exhaust gas cools and dilutes in the atmosphere, or these molecules can condensate on the surfaces of soot particles. With a DOC installed, the semi-volatile nucleation mode exists at high load and high FSC, even though no nucleation mode was measured without an after-treatment system installed [11, 17, 22, 23].

Many countries with developing economies have become significant and growing contributors to sulphur containing particulate emissions as there are many high-FSC (fuel sulphur content) fuels in use. In many cases, a high-efficiency Diesel Particulate Filter (DPF) with a wall flow design cannot be used

in conditions with high sulphur level fuels. Moreover, its application is less cost efficient than a Particulate Oxidation Catalyst's (POC) [24, 25]. A POC, combined with a Diesel Oxidation Catalyst (DOC) placed upstream, is a significant emissions control technology used to reduce the PM in those applications, and also typically to meet Euro 3 and Euro 4 emission limits. The POC system is a flow-through passive self-regenerating and maintenance-free partial Diesel particulate filter. In the worst case scenario, there is a high sulphur fuel in use and the engine is running at low load (low exhaust temperature) for an extended period without phases allowing the passive system to operate. This scenario was targeted for simulation in this study, illustrating the differences between three fuel sulphur content levels and low driving speeds, as encountered under urban driving conditions in major cities in India and China with rural high-FSC fuels (as high as 2500 ppm S).

2. Laboratory facilities

Studies were performed on an engine test bed with an eddy-current dynamometer, equipped with a number of measuring channels with a 1 Hz acquisition rate. Pressure sensors installed both upstream and downstream of the POC system permitted determination of the soot loading as well as the rate of POC regeneration during the test. The temperature sensors, which were installed close to the pressure sensors, were very closely observed for any gas temperatures fluctuation which could strongly interrupt soot collection inside the POC system. A Horiba gas analyser was also embedded into the test stand to measure gaseous compounds, together with an AVL Smoke Meter for particulate emission monitoring.

In order to measure particle reduction efficiency of the POC system, the sample, taken upstream or downstream of the aftertreatment system, was diluted using two stage dilution (ejector diluters). In the first stage the dilution air temperature was 250 °C and the dilution ratio (DR) was approximately 10. In the second stage, the dilution air temperature was equal to room temperature (25 °C) and the DR was approximately 8. To study the effects of FSC on volatile particle fraction and to mimic real-world exhaust particle formation [26], the exhaust sample was diluted using a porous tube diluter (PTD) [27, 28]. The PTD dilution system has been used widely in nucleation

mode particle studies [11, 18, 26, 28]. In the PTD, the dilution air temperature was 30 °C, the DR was set to 12 and the relative humidity of the dilution air was below 5%. After passing through the PTD, the diluted sample was led into an ageing chamber and secondary dilution was conducted by an ejector (DR 8, room temperature). The carbon dioxide concentration was measured in the raw exhaust and at two other locations in the sampling setup. Final dilution ratio corrections were performed according to these measured CO₂ concentrations. The particle size distributions were measured with an SMPS (DMA 3081 and UCPC 3025, TSI Inc.) [26, 27].



Fig. 1. Test bed control panel

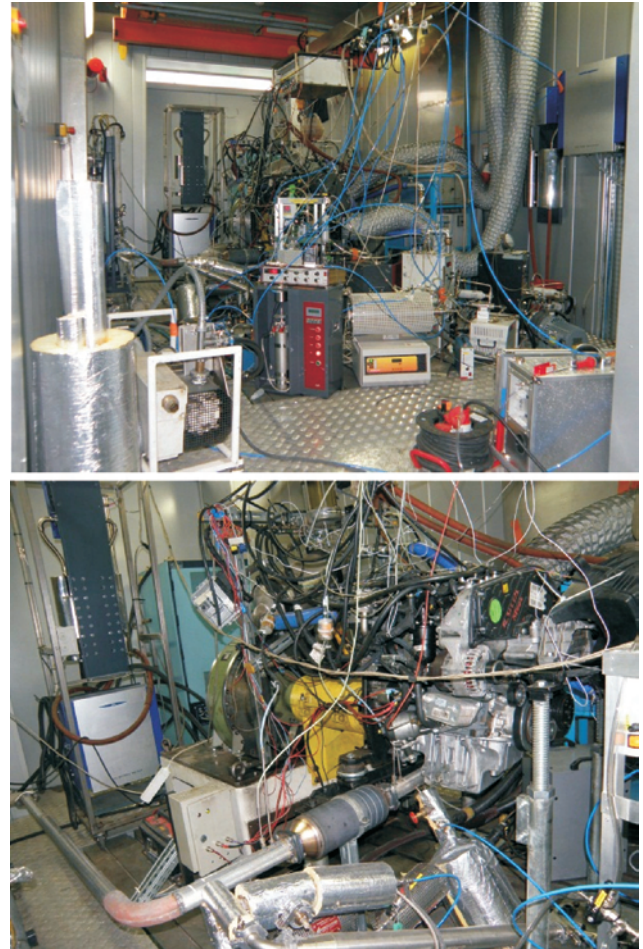


Fig. 2. Test bed layout

3. Measurement approach

Three identical samples of DOC+POC systems were used to test three different fuels containing 6 ppm, 65 ppm and 340 ppm of sulphur, hereafter referred to as: S6, S65 and S340. The engine used for testing was a passenger car diesel engine complying with the Euro 4 emission standard with 1.9 l of displacement and a maximum output power of 150 HP. The test profile used for the comparison study lasted 49 h and consisted of two phases, determined according to the smoke number (FSN) and the inlet DOC+POC exhaust gas temperature as crucial factors:

- Soot loading phase – 48 h of engine operation at a low load point with a maximum exhaust temperature of 250 °C (to

simulate urban driving conditions in major cities in India and China).
 – Regeneration phase – 1 h of engine operation at a medium load point with a maximum exhaust temperature of 400 °C (to simulate conditions where regeneration initiates following a long loading period).

The test cycle was run for each fuel of different sulphur content. The loading phase was performed in order to evaluate the amount of soot collected in the POC as a function of fuel sulphur content. Loading of the POC system was possible due to the low exhaust temperature (below 250 °C) to avoid regeneration and FSN values in the range 0.35 to 0.65 (depending on fuel type) which were reasonable values for such a low engine load. Moreover, gaseous emission measurement permitted evaluation of the influence of the fuel sulphur content on catalyst efficiency. Each loading phase was commenced with the POC empty of soot, which was weighed, and continued with the soot loading process. The monotonic accumulation of soot was determined by observation of backpressure increase over 48 h of the loading phase. The final evaluation of collected soot was performed directly by re-weighing the loaded POC after 48 h of soot loading, and thus the accumulated mass was calculated. The loaded POCs were then tested under the regeneration phase, which – due to the high temperature of the exhaust gas – allowed

the POC to regenerate. The phenomenon of regeneration was observed via continuous acquisition of gaseous emissions, exhaust backpressure and temperature. This phase lasted 1 h and a stabilization of backpressure decrease was observed upon completion.

4. Results

4.1. Continuous backpressure and temperature monitoring

Continuous acquisition of gas pressures and temperatures was conducted for each of the three cycles. The pressure drop over the DOC+POC was determined by two pressure sensors placed upstream and downstream of the sample. Together with the pressure sensors, thermocouples were installed in order to measure both temperatures. Figure 3 shows the results obtained for all three fuels.

The 48 hours of soot loading resulted in a significant increase in the backpressure upstream of the POC, as shown in Figure 3. Although engine load and speed remained the same for the 48h loading phase, the exhaust gas temperature was affected by the changes in backpressure. Temperature increases were observed both upstream and downstream of the POC. Figure 3a shows unexpected peaks in the temperature upstream of the POC after 10 h of soot loading and Figures 3b and 3c show peaks after 35 h and 25 h. The temperature rises were

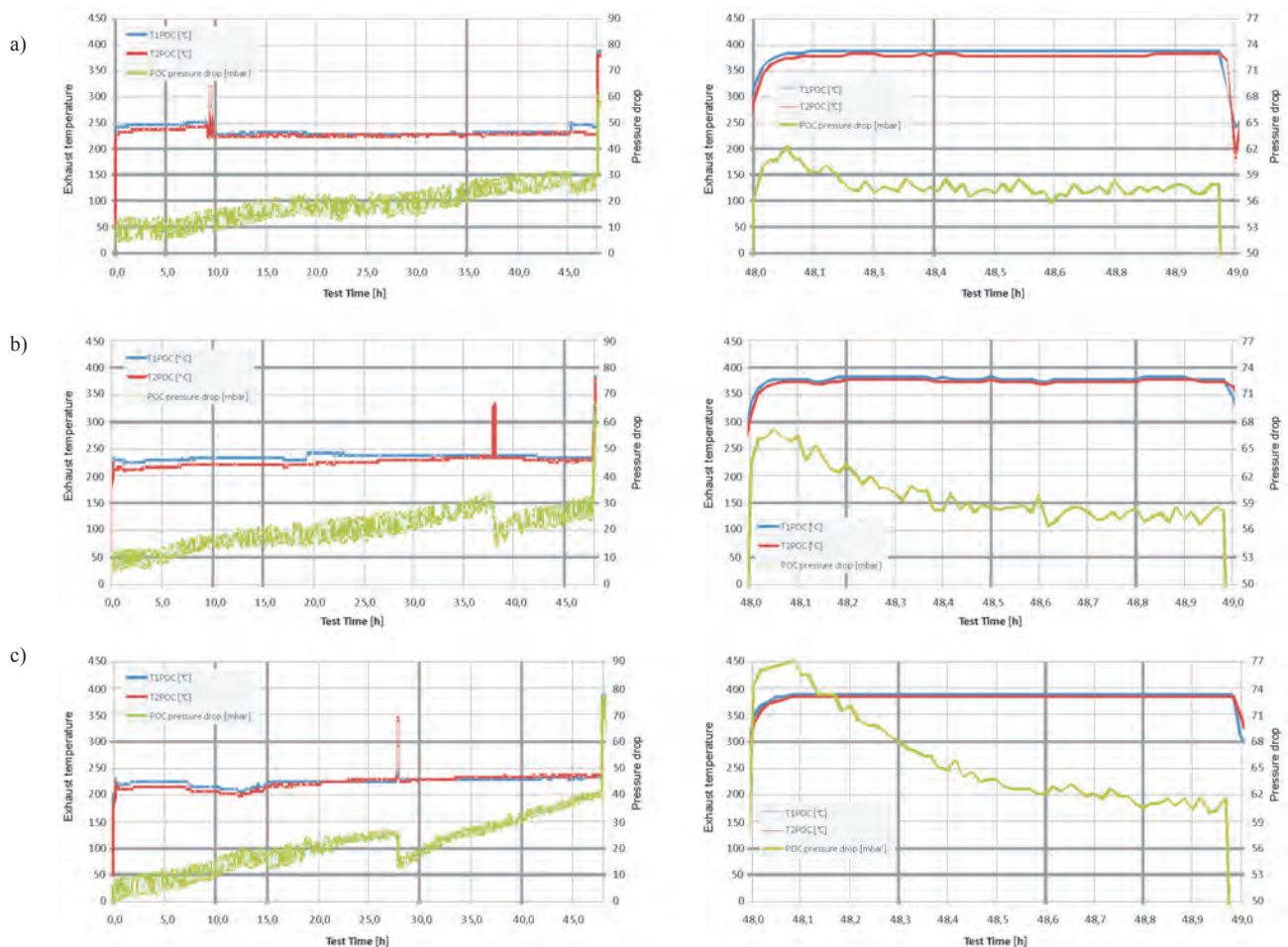


Fig. 3. Backpressure and temperature changes during the loading and regeneration phases for all three fuels: a) S6, b) S65, c) S340; T1POC – temperature upstream of the DOC, T2POC – temperature downstream of the POC

caused by the uncontrolled behaviour of the engine's EGR valve. The peaks exceeded 250 °C, which resulted in the rapid burning of accumulated soot, rapid growth of the temperature downstream of the POC system and a reduction in backpressure. However, a clear correlation between backpressure and temperature can be observed, apart from in the vicinity of the deviation. The fuel sulphur content significantly influenced the backpressure growth rate and, consequently, the POC pressure drop. An increase of 20 mbar in pressure drop was observed for the S6 fuel, 20 mbar for S65 and 35 mbar for S340, as shown in Figure 3. The pressure drop increase corresponds to the amount of accumulated matter, which was proved by the direct weighing of the POC system.

Immediately after the loading phase, the engine operating point was changed to a higher load and speed resulting in an increase in exhaust temperature and mass flow. The exhaust gas temperature was nearly 400 °C, causing passive regeneration of the POC. The temperature remained stable during the entire regeneration phase, whilst the pressure drop changed as the POC was being cleansed of soot. The shape of the backpressure trace was observed to differ, depending on the accumulated soot and the regeneration temperature. Stabilisation occurred first after 0.3 h on S6 fuel (visible in Fig. 3a). A similar stabilisation was observed on S65 fuel whilst the backpressure was still visibly decreasing even after 1 h on S340 fuel, as shown in Figure 3c. During the one hour regeneration, the highest average regeneration rate occurred in the POC loaded with exhaust from combustion of the S340 fuel. The S6 and S65 regeneration rates reached respectively lower values in terms of pressure drop.

4.2. Soot accumulation

Example high-resolution transmission electron microscope (HR-TEM) images of emitted soot particles collected during the loading phase with the S340 fuel are presented in Figure 4. The particle sample was first diluted with a single ejector diluter (DR~10) and, then the sample particles were conducted through a tube furnace at a temperature of approximately 700 °C, in order to remove the volatiles from the soot particles. The particles were collected on holey carbon-coated copper TEM grids by first charging them with a corona charger and then collecting the particles with an electric field. As can be seen from Figure 4a, the particles collected were carbon agglomerates consisting of spherical primary particles. Most of the primary particles were roughly 20 nm in diameter. Figure 4b presents the fine structure of soot agglomerates. The figure shows that individual graphene layers, (i.e. the consecutive thin black and white lines in the soot particles), can be observed within the soot structure. The graphene layers tend to be longer and more organized near the edges of the primary particles. In the center of the primary particles, fewer organized graphene layers can be seen as the particle fine structure is more amorphous. Overall, the soot agglomerates emitted are quite typical in terms of particle structure. Similar structures of soot particles have been reported before, for example, by Happonen et al. (2010) [28] with a heavy-duty off-road diesel engine and by Su et al. (2004) [29] with a heavy-duty Euro IV diesel engine.

All three samples of the DOC+POC were fresh before testing. Each unit was weighed before the loading phase in

order to establish a reference weight for further weighing. After 48 h of soot accumulation, the samples were removed from the engine exhaust line and weighed hot on a portable balance with a resolution of 0.5 g. After the weighing, the samples were remounted on the exhaust line. Before starting the regeneration phase, the samples were conditioned at the engine load of the loading phase until all parameters were

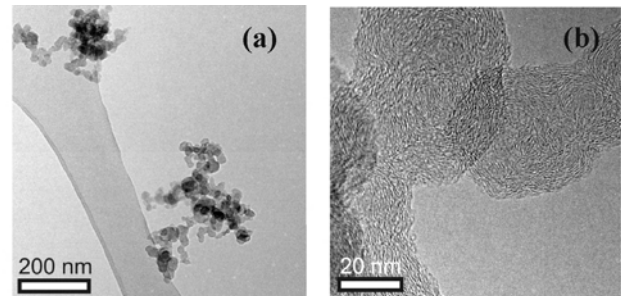


Fig. 4. Example soot particles collected during the loading phase with the S340 fuel. Both an overview of two soot agglomerates (a) and some of the fine structure of soot (10x) (b) are presented

stabilized. The calculated difference was 6 g for S6 fuel, 10 g for S65 and 38 g for S340. The results are shown in Table 1. The filter smoke number (FSN) (measured downstream of the POC at the beginning of the loading phase) increased proportionally with fuel sulphur content (Tab. 1).

Table 1. PM mass in POC and FSN for three types of fuel

Type of fuel	S6	S65	S340
Mass of accumulated matter [g]	6	10	38
Filter smoke number (FSN) at The beginning of loading phase	0.35	0.53	0.67

The shapes of the particle reduction efficiency curves (Fig. 5) were similar to the ones observed for heavy duty diesel engine applications [32, 33]; the highest reduction efficiencies were observed at the smallest particle sizes and the reduction efficiency decreased from ~60% at 15 nm to ~30% at 100 – 200 nm. After 20 hours of engine operation, the shapes of the reduction efficiency curves were similar for each fuel. However, after 40 hours, the reduction efficiency was slightly higher with the S6 fuel compared to the S65 and S340 fuels.

The nonvolatile particle reduction efficiencies with the DOC+POC were studied during both driving phases, and the results are presented in Figure 6. The engine load affected the soot particle concentrations and their reduction within the DOC+POC; the particle number concentrations were approximately 4 times higher during the regeneration and the reduction efficiency was also increased. The soot number reduction was ~50% during the regeneration phase compared to 30 – 40% observed during the loading phase. The differences are caused by flow pattern changes in the DOC+POC system; exhaust temperature and the flow face velocity of the DOC+POC increased from ~240 °C to ~380 °C and from 2 m/s to 10 m/s, respectively, as the load was increased from the light to the medium load point.

4.3. Gaseous emissions

Engine-out and post-DOC+POC gaseous emissions of THC, CO, NO_x and NO₂ were measured during the loading phase, with the exhaust gas temperature below 250 °C. The dependency of catalyst efficacy on temperature is widely recognised; low temperatures enhance the influence of the fuel on catalyst efficiency and make the drawing of conclusions clearer.

Calculated values of the catalyst conversion efficiency are shown in Figure 7. The engine-out emission of NO_x was found not to be affected by FSC; as all pre-DOC emissions of NO_x remained at a similar level. Nevertheless, an influence of FSC on the NO₂/NO_x ratio in the raw exhaust was observed. The experiment confirmed the minor impact of usage of a DOC+POC on NO_x emission. However, NO₂ emission was significantly affected.

All measurements confirmed the decrease of NO₂ downstream of the DOC+POC, which was named NO₂ consumption. The intensity of this phenomenon was calculated according to (1) – the same formula used for evaluation of the conversion efficiency of other pollutants:

$$NO_2 \text{ consumption} = \frac{NO_{2,preDOC} - NO_{2,postPOC}}{NO_{2,preDOC}} \times 100\% \quad (1)$$

During the regeneration phase, the research focused on the emission of nitrogen oxides and hydrocarbons, as shown in Figure 8. The blue trace shows THC emission and for all

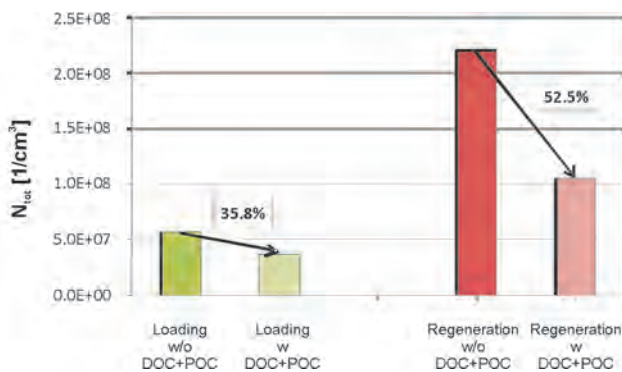


Fig. 6. Soot particle number concentrations upstream (w/o) and downstream (w) of the DOC+POC during the loading (low load) and regeneration (medium load) phases (S6 fuel). The percentages indicate the particle number reduction effected by the DOC+POC

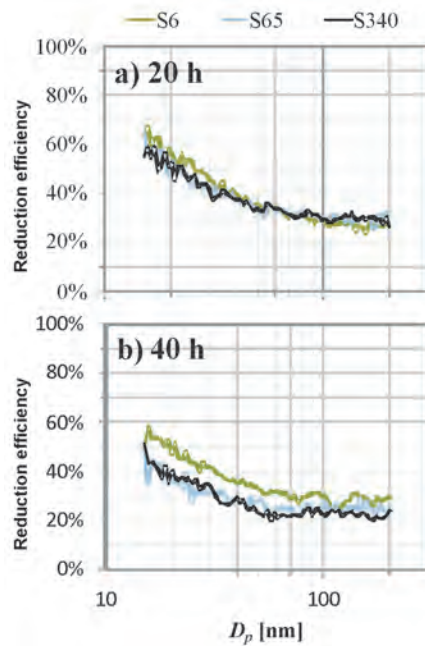


Fig. 5. Size-dependent soot particle reduction efficiencies of the DOC+POC at (a) 20 hours and (b) 40 hours after the start of the loading phase. Pressure drops over the DOC+POC (in mbar) were 18.1, 20.5, and 21.7 (a) and 17.9, 27.0 and 31.2 (b), with the S6, S65 and S340 fuels, respectively

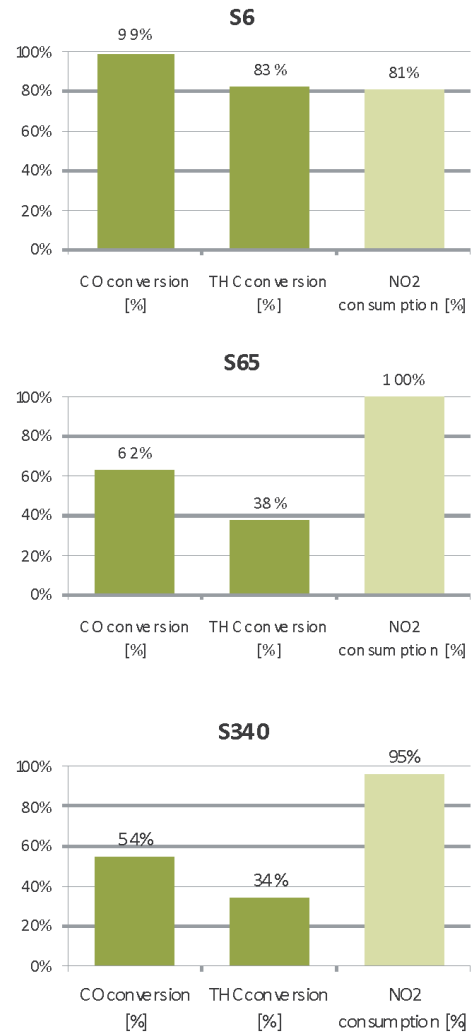


Fig. 7. DOC+POC conversion efficiency for different fuels

three tests the emission decreased, with some fluctuation for S340 at the beginning. Shown in orange, the emission of NO – and presumably the consequential NO_x emission – increased for the first 0.1 h (6 min) but soon stabilised as the temperature in the combustion chamber achieved a certain level. The brown line shows a direct NO_x measurement and it is to be considered the background for the NO₂ emission.

4.4. Particulate matter measurements

The main focus of the research was to evaluate the POC performance of PM emission reduction against gradual levels of its loading and during high temperature regeneration. Therefore, an AVL SMART SAMPLER SPC 472 was used in order to measure PM emission downstream of the POC. The results obtained during the loading phase are shown in Figure 9. PM emission increased as the loading phase advanced for fuels S65 and S340; for S6 fuel emissions were similar at the beginning and end of the phase. The results indicate that POCs coping with high FSC fuels are loaded earlier, and that their ability to absorb PM is diminished. For that reason, the intervals between high temperature regenerations should get shorter as the sulphur level in fuel increases. The regeneration

phase lasted 60 min and two 20 min measurements of PM were then performed. The first one started together with the

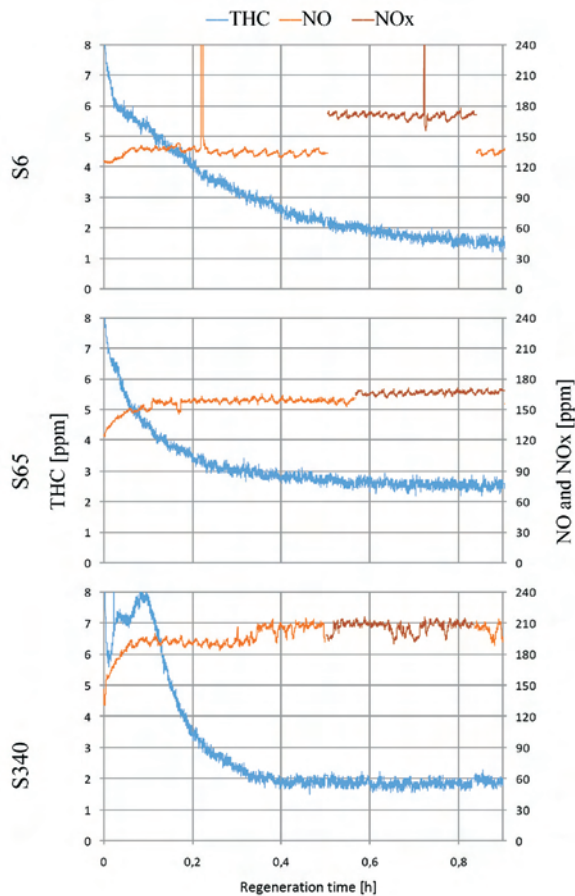


Fig. 8. Gaseous emission of THC, NO and NOx during the regeneration phase

beginning of the regeneration phase and the next one started 20 min later, as shown in Figure 10. The results obtained confirm the dependence of PM emission on the fuel sulphur content, as PM emission increased proportionally with sulphur mass concentration. In all cases, emission measured during the second 20 min of regeneration was lower. This proves that either the loaded POC's emission reduction capability is lower during the first 20 min of regeneration, or some of the accumulated matter is being blown out of the POC due to the increased exhaust gas flow rate.

5. Discussion

The negative impact of high-sulphur fuels on emissions was determined some years ago. Sulphur harms the environment in several ways. The direct products of burnt sulphur are sulphur dioxide (SO₂) and sulphur-based particulate matter. Moreover, its poisonous influence on catalysts decreases the conversion efficiencies of THC, CO and NO_x (for gasoline engines) and tailpipe emissions consequently increase. The reduced oxidative ability of the catalyst also decreases the conversion of NO to NO₂, which requires a higher regeneration temperature for the particulate filter. However, sulphur is a naturally occurring component of crude oil and remains

in diesel and gasoline fuels unless additional effort is expended to ensure its elimination. Western countries decided to gradually decrease the fuel sulphur content by applying further technological efforts in fuel production. The current limit in the EU is 10 ppm. In developing countries, the fuel quality and emission limits are continually becoming stricter, but there are still relatively high contents of sulphur in diesel fuel. Although most countries declare their intention to reduce the amount of sulphur in fuel in the future, in the meantime, emissions can be reduced by aftertreatment devices and development engine control, such that the system is equipped to cope with high sulphur fuels.

In this case, the research efforts must focus on simple and reliable solutions that cope with sulphured fuels and can be accepted by developing countries, especially in terms of cost. The fulfilment of these requirements is the aim of the POC. The S340 exhaust gas contains significantly more PM than S6 exhaust, which can be indirectly read from Table 1. This study has confirmed the POC's capability in terms of collect-

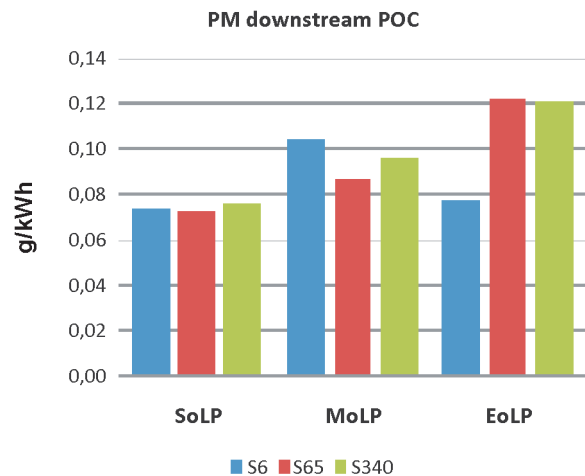


Fig. 9. PM emission at various stages of the loading phase; S/M/EoLP – Start/Middle/End of Loading Phases

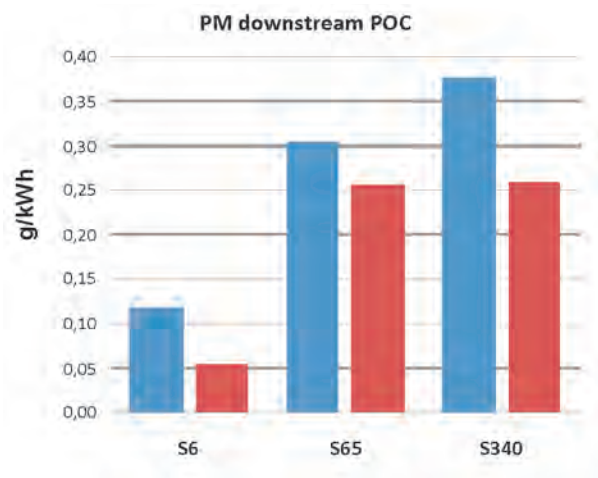


Fig. 10. PM emission at regeneration phase; blue bars – measurement during the first 20 min of the regeneration phase; red bars – measurement during the second 20 min of the regeneration phase

ing PM and, as a result, decreasing tailpipe PM emissions. As predicted, the sulphur decreased the effectiveness of THC and CO conversion at temperatures below 250 °C, as shown in Figure 7. However, the conversion at higher temperatures was not strongly affected. Weighing measurements indicated strong effects of the FSC on the accumulated material in the DOC+POC. However, there was no significant difference in the engine out soot particle emissions and soot reduction efficiency between the fuels. This indicates that sulphur based material is also accumulated in the DOC+POC, by adsorption on the washcoat or on the accumulated particles. The adsorption sulphur onto the washcoat of the DOC affects the reduction of gaseous pollutants.

6. Conclusions

The purpose of this study was to investigate the impact of sulphur containing fuels on POC catalyst operation and extend current understanding. Low exhaust temperature loading followed by regeneration events especially reflects the performance of DOC+POC in passenger cars in urban driving conditions in metropolitan cities, where high sulphur fuel and very low exhaust gas temperatures simultaneously cause additional challenges. The analysis of the test results permitted the following conclusions to be drawn:

– The amount of matter collected and the corresponding pressure drop over the system depends on the sulphur level in the diesel fuel. PM accumulation during the loading phase is proportional to the fuel sulphur level.

- The regeneration of POCs with higher soot loads results in higher PM emission.
- Tailpipe PM emission during regeneration is always higher at the beginning of the phase than in the later stages of the phase.
- Elevated exhaust temperatures (up to approx. 400 °C) affect total cleansing of the system from soot for all three fuel types, although the recovery time differs and depends on the fuel type.
- For proper understanding of gaseous emissions, it is crucial to compare the data collected at the same temperature; for this reason, each measurement was performed under the following conditions: at 207 °C; at 50 Nm (with temperature determined by engine load); and at 245 °C.
- The ability of the DOC+POC to convert CO, HC and NO_x increases with the exhaust temperature.
- The particle reduction efficiency of the DOC+POC is dependent on particle size and exhaust flow velocity & temperature.
- NO₂ emission during the loading phase is higher in the engine-out exhaust than downstream of the POC. NO₂ conversion ranged from 83% up to 100% for S65 and S340 fuels, with no temperature dependency observed. A strong temperature dependency was observed for S6, resulting in a conversion drop from 74% at 207 °C to 1% and 8% at 245 °C.

Periodical random movement of the EGR valve was observed during the loading phase, causing short-term rises in the exhaust gas temperature, resulting in a partial burn-out of collected soot.

Acknowledgements

Professor L. Reine Wallenberg and the nCHREM of Lund University are acknowledged for enabling HR-TEM imaging.

Badania charakterystyki pracy reaktora katalitycznego utleniającego cząstki stałe (POC) oraz zjawiska formowania się cząstek stałych dla olejów napędowych z różną zawartością siarki

W artykule opisano analizę ogólnego wpływu olejów napędowych z dużą zawartością siarki na pracę reaktora katalitycznego utleniającego cząstki stałe (POC), skupiając się głównie na redukcji masy i liczby cząstek stałych i zdolności regeneracji reaktora po nagromadzeniu się w nim sadzy. Podstawą do przeprowadzenia badań opisanych w tej pracy jest występowanie oleju napędowego o wysokiej zawartości siarki w krajach rozwijających się, szczególnie w Azji. Podwyższona zawartość siarki skutkuje wzrostem emisji cząstek stałych, co stawia dodatkowe wymagania układowi oczyszczania spalin. Jako prostą i niedrogą metodę ograniczania szkodliwej emisji stosuje się reaktor utleniający POC, który dzięki swej bezobsługowej konstrukcji pozwala jest możliwy do zastosowania nawet w użytkowanych już pojazdach. Przeprowadzone badania na paliwach o wysokiej zawartości siarki potwierdziły pozytywny wpływ zastosowania reaktora POC na poziom emisji cząstek stałych oraz jego bezawaryjność nawet przy wysokim poziomie załadowania sadzą.

Badania przeprowadzono na silniku zamontowanym na stanowisku hamownianym w Zakładzie Badań Silników Instytutu BOSMAL w Bielsku-Białej. Do pomiarów emisji gazowych składników spalin wykorzystano zestaw analizatorów Horiba Mexa 7000, a stopień zadymienia spalin (FSN) mierzono za pomocą urządzenia AVL Smoke Meter. Pomiar liczby i średnic cząstek stałych były wykonywane przez specjalistów z Tampere Technical University przy zastosowaniu specjalistycznych urządzeń pomiarowych z firm TSI i Dekati.

Badania wykonywano dla olejów napędowych o trzech różnych zawartościach siarki: 6, 65 i 340 ppm. Wyniki badań przedstawione w artykule dają ogólny pogląd na specyfikę i problemy związane z zastosowaniem reaktora POC do układu wydechowego silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego paliwami o podwyższonej zawartości siarki. Metodyka badań została ustalona eksperymentalnie i przeprowadzona na reaktorach POC współpracujących z silnikiem o zapłonie samoczynnym wyposażonym w układ zasilania common rail oraz spełniających normę emisji Euro 4. Każde paliwo było testowane na identycznym, nowym reaktorze POC podłączonym do reaktora utleniającego DOC, który stanowił podstawowe wyposażenie badanego silnika.

Pierwsza faza testu, zwana fazą załadowania, obejmowała 48 godzin pracy ciągłej silnika w ustalonym punkcie, w którym temperatura spalin, mierzona na wejściu do reaktora nie przekraczała 250 °C. Miało to na celu zasymulowanie skrajnie trudnych warunków pracy układu w intensywnym ruchu miejskim i nagromadzenie jak największej ilości sadzy wewnątrz reaktora POC. Powyższe warunki utrudniają lub wręcz uniemożliwiają zajście procesu regeneracji pasywnej POC.

Druga faza testu – regeneracji, obejmowała analogiczną pracę silnika w czasie 1 godziny, przy czym temperatura spalin została podwyższona i wynosiła 400 °C. W takich warunkach pracy obserwowano proces i czas samooczyszczenia się POC podczas regeneracji pasywnej z nagromadzonych wcześniej cząstek stałych.

Ilość zgromadzonej sadzy, w fazie załadowania, określana była za pomocą ciągłego pomiaru ciśnienia statycznego spalin przed i za POC. Intensywność wzrostu ciśnienia narastała wraz ze wzrostem zawartości siarki w paliwie. Po zakończeniu fazy załadowania wszystkie egzemplarze POC zostały zważone i potwierdziły się obserwacje wynikające ze wzrostu ciśnienia. Badania wykazały pogorszenie sprawności konwersji składników gazowych, takich jak węglowodory (THC) oraz tlenek węgla (CO) w temperaturze poniżej 250 °C wraz ze stopniem załadowania POC cząstkami stałymi. Jak przypuszczano, nie wykazano znaczącego wpływu reaktora na ogólną emisję tlenków azotu (NO_x). Zaobserwowano natomiast zwiększenie udziału tlenku azotu (NO) w sumarycznym bilansie (NO_x) za reaktorem POC. Zdolność reaktora do konwersji THC oraz CO wzrasta w sposób znaczący przy temperaturze spalin 400 °C, która wybrana została do regeneracji POC. Oczyszczaniu reaktora w początkowej fazie towarzyszy wzrost emisji cząstek stałych, który spada wraz z postępowaniem procesu oczyszczania. Stwierdzono również znaczący wzrost redukcji suchych cząstek do około 50% (27–38% dla spalin o niskiej temperaturze w fazie załadowania).

Słowa kluczowe: reaktor katalityczny utleniający cząstki stałe (POC), zawartość siarki w oleju napędowym, redukcja cząstek stałych, regeneracja

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography

- [1] Bielaczyc P., Keskinen J., Dzida J., Sala R. et al.: Performance of Particle Oxidation Catalyst and Particle Formation Studies with Sulphur Containing Fuels, SAE Int. J. Fuels Lubr. 5(2),2012, doi:10.4271/2012-01-0366.
- [2] Dockery D., Pope A., Xu X., Spengler J., Ware J., Fay M., Ferris B., Speizer F.: An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. The New England Journal of Medicine 1993, 329, 1753-1759.
- [3] Pope C., Burnett R., Thun M., Calle E., Krewski D., Ito K., Thurston G.: Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. The Journal of the American Medical Association 2002, 287, 1132-1141.
- [4] Peters A., Dockery D., Muller J., Mittleman M.: Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction. Circulation 2001, 103, 2810-2815.
- [5] Ghi A., Kim C., Devlin R.: Concentrated ambient air particles induce mild pulmonary inflammation in healthy human volunteers. American Journal of Respiratory Critical Care Medicine 2000, 162, 981-988.
- [6] Saldiva P., Clarke R., Coull, Stearns R., Lawrence J., Murthy G., Diaz E., Koutraki P., Suh H., Tsuda A., Godlesi J.: Lung inflammation induced by concentrated ambient air particles is related to particle composition. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 2002, 165, 1610-1617.
- [7] Dybdahl M., Risom L., Bornholdt J., Autrup H., Loft S., Wallin H.: Inflammatory and genotoxic effects of diesel particles in vitro and in vivo. Mutation Research 2004, 562, 119-131.
- [8] Mazzarella G., Ferraraccio F., Prati M., Annunziata S., Bianco A., Mezzogiorno A., Liguori G., Angelillo I., Cazzola M.: Effects of diesel exhaust particles on human lung epithelial cells: An in vitro study. Respiratory Medicine 2007, 101, 1155-1162.
- [9] Crüts B., Etten L., Törnqvist, H., Blomberg A., Sandström T., Mills N., Borm P.: Exposure to diesel exhaust induces changes in EEG in human volunteers. Particle and Fibre Toxicology 2008, 5, 4.
- [10] Bielaczyc P., Merksiz J., Kozak M.: Analysis of the Influence of Fuel Sulphur Content on Diesel Engine Particulate Emissions, SAE Technical Paper 2002, 2002-01-2219.
- [11] Bielaczyc P., Kozak M., Merksiz J.: Effects of Fuel Properties on Exhaust Emissions from the Latest Light-Duty DI Diesel Engine, JSAE 20030355, SAE Technical Paper 2003, 2003-01-1882.
- [12] Kittelson D.B.: Engines and nanoparticles: a review, Journal of Aerosol Science 1998, 29, 5-6, 575-588.
- [13] Heikkilä, J., Virtanen, A., Rönkkö, T., Keskinen, J., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T. Nanoparticle Emissions from a Heavy-Duty Engine Running on Alternative Diesel Fuels, Environmental Science & Technology 2009, 43, 9501-9506.
- [14] Rönkkö T., Virtanen A., Vaarasahti K., Keskinen J., Pirjola L., Lappi M.: Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: Laboratory and on-road study. Atmospheric Environment 2006, 40, 2893-2901.
- [15] Vogt R., Scheer V., Casati R., Benter T.: On-Road Measurement of Particle Emission in the Exhaust Plume of a Diesel Passenger Car. Environmental Science and Technology 2003, 37, 4070-4076.
- [16] Rönkkö T., Virtanen A., Kannosto J., Keskinen J., Lappi M., Pirjola L.: Nucleation mode particles with a nonvolatile core in the exhaust of a heavy duty diesel vehicle. Environmental Science and Technology 2007, 41, 6384-6389.
- [17] Filippo A.D., Maricq M.M.: Diesel Nucleation Mode Particles: Semi-volatile or Solid? Environmental Science and Technology 2008, 42, 7957-7962.
- [18] Uhrner U., von Löwis S., Vehkamäki H., Wehner B., Bräsel S., Hermann M., Stratmann F., Kulmala M., Wiedensohler A.: Dilution and aerosol dynamics within a diesel car exhaust plume—CFD simulations of on-road measurement conditions. Atmospheric Environment 2007, 41, 7440-7461.
- [19] Lemmetty M., Pirjola L., Rönkkö T., Virtanen A., Keskinen J.: The effect of sulphur in diesel exhaust aerosol: models compared with measurements. Aerosol Science and Technology 2008, 42, 916-929.
- [20] Maricq M., Chase R., Xu N., Laing P.: The Effects of the Catalytic Converter and Fuel Sulfur Level on Motor Vehicle Particulate Matter Emissions: Light Duty Diesel Vehicles. Environmental Science and Technology 2002, 36, 283-289.

- [21] Schneider J., Hock N., Weimer S., Borrmann S., Kirchner U., Vogt R., Scheer V.: Nucleation Particles in Diesel Exhaust: Composition Inferred from In Situ Mass Spectrometric Analysis. *Environmental Science and Technology* 2005, 39, 6153-6161.
- [22] Lehtoranta K., Matilainen P., Åsenbrygg J.M., Lievonen A., Kinnunen T.J.J.: Particle Oxidation Catalyst in Light Duty and Heavy-Duty Diesel Applications. *Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper* 2007, 2007-24-0093.
- [23] Lehtoranta K., Matilainen P., Kinnunen T.J.J., Heikkilä J., Rönkkö T., Keskinen J.: Diesel Particle Emission Reduction by a Particle Oxidation Catalyst. *Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper* 2009, 2009-01-2705.
- [24] Lähde T., Rönkkö T., Happonen M., Söderström C., Virtanen A., Solla A., Kytö M., Rothe D., Keskinen J.: Effect of Fuel Injection Pressure on a Heavy-Duty Diesel Engine Non-volatile Particle Emission. *Environ. Sci. Technol.* 2011.
- [25] Karjalainen P., Heikkilä J., Rönkkö T., Keskinen J., Lehtoranta K., Matilainen P., Kinnunen T.: Effect of Exhaust Flow Conditions and External Cooling on the Performance of the Particle Oxidation Catalyst (POC), *SAE Technical Paper Series* 2010, 2010-01-2158.
- [26] Wang S.C., Flagan R.C.: Scanning Electrical Mobility Spectrometer, *Aerosol Science and Technology* 1990, 13, 230-240.
- [27] Chen D.R., Pui D., Hummes D., Fissan H., Quant F., Sem G.: Design and Evaluation of a Nanometer Aerosol Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA), *J. Aerosol Sci.* 1998, 29, 497-509.
- [28] Happonen M., Lähde T., Messing M.E., Sarjovaara T., Larmi M., Wallenberg L.R., Virtanen A., Keskinen J.: The comparison of particle oxidation and surface structure of diesel soot particles between fossil fuel and novel renewable diesel fuel, *Fuel* 2010, 89, 4008-4013.
- [29] Su D.S., Müller J.O., Jentoft R.E., Rothe D., Jacob E., Schlögl R.: Fullerene-like soot from Euro IV diesel engine: consequences for catalytic automotive pollution control. *Topics in Catalysis* 2004, 30 (1), 241-245.

Jorma Keskinen, DEng. – professor, Head of Department of Physics, Tampere University of Technology, Finland.

Dr inż. Jorma Keskinen – profesor, Dyrektor Instytutu Fizyki Politechniki w Tampere, Finlandia.

e-mail: jorma.keskinen@tut.fi



Topi Rönkkö, DEng. – lecturer in Department of Physics, Tampere University of Technology, Finland.

Dr inż. Topi Rönkkö – wykładowca w Instytucie Fizyki Politechniki w Tampere, Finlandia.

e-mail: topi.ronkko@tut.fi



Panu Karjalainen, MEng. – researcher in Aerosol Physics Laboratory, Department of Physics, Tampere University of Technology, Finland.

Mgr inż. Panu Karjalainen – pracownik badawczy w Laboratorium Fizyki Aerozoli w Instytucie Fizyki Politechniki w Tampere, Finlandia.

e-mail: panu.karjalainen@tut.fi



Matti Happonen, MEng. – researcher in Aerosol Physics Laboratory, Department of Physics, Tampere University of Technology, Finland.

Mgr inż. Matti Happonen – pracownik badawczy w Laboratorium Fizyki Aerozoli w Instytucie Fizyki Politechniki w Tampere, Finlandia.

e-mail: matti.happonen@tut.fi



Piotr Bielaczyc, DEng. – head of the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biała.

Dr inż. Piotr Bielaczyc – kierownik Zakładu Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.bielaczyc@bosmal.com.pl



Rafał Sala, MEng. – research Engineer in Engine Research Department, Bosmal Automotive Research & Development Institute Ltd, Bielsko-Biała, Poland.

Mgr inż. Rafał Sala – inżynier badawczy w Laboratorium Badań Silników Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej.

e-mail: rafal.sala@bosmal.com.pl



Jakub Dzida, MEng. – research Engineer in Engine Research Department, Bosmal Automotive Research & Development Institute Ltd, Bielsko-Biała.

Mgr inż. Jakub Dzida – inżynier badawczy w Laboratorium Badań Silników Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej.

e-mail: jakub.dzida@bosmal.com.pl



Toni Kinnunen, PhD. – chief Technology Officer (CTO) in EcocatOy, Finland.

Dr Toni Kinnunen – dyrektor ds. technicznych w firmie EcocatOy w Finlandii.

e-mail: toni.kinnunen@ecocat.com



Pekka Matilainen, MSc. – senior Researcher of Physics in EcocatOy, Finland.

Mgr Pekka Matilainen – starszy pracownik badawczy w dziedzinie fizyki w firmie EcocatOy w Finlandii.

e-mail: pekka.matilainen@ecocat.com



Maria E Messing, PhD. – postdoctoral fellow in Solid State Physics/Synchrotron Radiation Research, Lund University, Sweden.

Dr Maria E. Messing – odbywa staż podoktorski w Laboratorium Fizyki Ciała Stałego i Promieniowania Synchrotronowego Uniwersytetu w Lund w Szwecji.

e-mail: maria.messing@ftf.lth.se



Emissions calibration yesterday, today and tomorrow

The ever increasing complexity in engine control systems and diagnostics functionality, which are vital to meet current and future emissions legislation, presents the industry with the problem of increased programme development and labour costs. As the degree of subsystem complexity intensifies, so too does the requirement for anticipatory driving behaviour knowledge; thereby introducing predictive operating strategies into drivetrain management systems. For example, it is possible to improve the accuracy of gear pre-selection calibrations in dual clutch transmissions by including GPS and gradient sensor data as input parameters; thus improving the off-cycle fuel efficiency of the vehicle. Similarly, benefits can be found by avoiding frequent changes in the combustion engine's operating point or taking the engine's cold start behaviour into account, as well as the effectiveness of the exhaust after-treatment systems, etc. The calibration of conventional powertrain systems are often only solvable with significant effort and the calibration of hybrid management systems are becoming just as complex. Therefore, a future that will require a deeper integration of more complex technologies without the support of structured methodologies, the trade-offs for CO₂ and other regulated emissions, performance, comfort, cost and effort cannot be efficiently found. This paper intends to present a standardised approach with which the immense effort in the measurement and simulation of these variables is significantly supported by methods of statistical based test planning, model generation and optimisation, which can be implemented across a wide variety of increasingly flexible development environments. A vision is presented of how the methodologies and tools that are being used today can be adapted in the future to enable engineers to continue to deliver industrialised calibrations that meet the growing legal requirements and fulfil customers' expectations.

Key words: automated calibration, calibration methodology, standardisation of processes, hybrid, ECU, TCU, DSG

Kalibracja emisji wczoraj, dziś i jutro

Nieustanny wzrost złożoności konstrukcji systemów sterowania silnikiem oraz stopień skomplikowania funkcji diagnostycznych niezbędnych do zaspokojenia bieżących oraz przyszłych wymagań dotyczących ograniczania emisji szkodliwych składników spalin wymagają od przemysłu motoryzacyjnego zwiększenia nakładów na programy rozwoju, a także zwiększenia kosztów pracy. Narastająca złożoność podsystemów wymaga wprowadzenia elementów i układów wyprzedzających reakcje kierowcy, wprowadzając tym samym predykcyjne strategie zarządzania systemami układów napędowych. Na przykład, możliwe jest poprawienie dokładności wyboru biegów przez kalibrację podwójnego sprzęgła skrzyni biegów za pomocą GPS i gradientów danych z czujników, jako parametrów wejściowych, co przyczyni się do obniżenia poziomu zużycia paliwa przez pojazd. Podobne korzyści mogą być uzyskane dzięki unikaniu częstych zmian warunków pracy silnika, a także optymalizacji pracy silnika podczas zimnego rozruchu, co również poprawi skuteczność katalitycznych układów oczyszczania spalin.

Kalibracja konwencjonalnych układów napędowych jest często możliwa do przeprowadzenia tylko przy znacznym nakładzie pracy, a kalibracja systemów zarządzania napędem hybrydowym jest jeszcze bardziej skomplikowanym procesem. Należy się spodziewać się, że już w niedalekiej przyszłości konieczne będzie stosowanie bardzo złożonych zintegrowanych technologii, wspierających zmniejszanie zużycia paliwa, a także ograniczających emisję dwutlenku węgla (CO₂) i innych szkodliwych składników spalin oraz poprawiających osiągi, komfort jazdy i obniżających koszty eksploatacji pojazdu.

W artykule przedstawiono standardowe podejście, w którym szeroki zakres niezbędnych badań empirycznych i symulacyjnych może być wspierany statystycznymi metodami planowania badań i optymalizacji, które mogą być implementowane w różnych elastycznych środowiskach programowych. Zaprezentowano także, w jaki sposób powinny być doskonalone obecnie stosowane metody i narzędzia, aby zapewnić w przyszłości dostępność narzędzi kalibracyjnych, spełniających rosnące wymagania prawne i oczekiwania użytkowników.

Słowa kluczowe: automatyczna kalibracja, metodologia kalibracji, kalibracja emisyjna, standaryzacja, napęd hybrydowy, ECU, TCU, DSG

1. Introduction

One of the major challenges for the automotive industry today is to condense product development times whilst maintaining quality. A reduction in the duration to get a new product to market enhances the company's overall flexibility to respond to changes in the marketplace.

A recent case where external factors forced unexpected change in the engine calibration community was the sudden

increase in oil prices combined with the financial crisis in late 2008. Within a matter of weeks, automakers witnessed the sales of their larger, less efficient vehicles drop to historic lows. It was clear that manufacturers would need to improve the fuel efficiency of their entire fleet in order to retain their share of the market. By mid-2009, most major automotive manufacturers in Europe were offering 'stop-start' functionality in at least some of their vehicles. Whilst it is probable

that many of these manufacturers had planned to introduce the ‘stop-start’ control functionality in the near term, it was the rapid rollout of this complex control strategy that helped them to reduce their certified fuel consumption figures by as much as 15% ‘overnight,’ thereby quenching the market’s initial thirst for more efficient vehicles.

The traditional approach to reducing product development times has been to substitute experimentation and testing of components or systems with simulation. Over the last 15 years there has been significant progress in the development and application of simulation tools, but due to the complexity of modern vehicles, it is not possible to completely replace experimentation and testing with simulation. In some cases work steps that were previously conducted in the testbed environment are moving back to road based testing. A combined approach is needed.

Furthermore, engines are required to operate in environmental extremes such as the harsh winters of northern Finland and the high ambient temperatures of Death Valley, California. For engines that use forced induction, the trade-off between performance and component protection in high altitudes creates a significant workload for calibration engineers. Simulation of these environmental conditions requires access to wind tunnels and climatic chambers combined with robust optimisation strategies for the thermal management systems; however this particular subject will not be the focus of this paper.

Most calibration engineers will tell you that the most stressful part of a project occurs during the months leading up to the calibration freeze date. Commonly it is because the robustness and maturity of the initial hardware supplied to the calibration team does not permit the creation of calibration datasets that can be used in the final production vehicle. During the earlier phases of a project it is equally common to find that engineers have very little workload predominantly due to the lack of suitable testing equipment.

Therefore, a process that can make use of this initial ‘slack’ time in calibration projects to provide useful data with minimal quantities of hardware is the key to reducing the overall project time. This process is known as ‘front loading’ the project and is the main focus of this paper.

2. The past

Up until the mid 20th century, the design ethos for internal combustion engine manufacturers was focused on improving the efficiency and power density of their products. However, in the booming post war economy of America, the environmental impacts from the widespread usage of I.C. engines were beginning to be noticed by legislators. By the late 1950’s the United States government had introduced the first emissions legislation for vehicles, with many western governments closely following suit.

However, during the subsequent two decades the emissions regulations were still comparatively relaxed and due to the limited technological capabilities of the time, more stringent legislative requirements would have proved difficult to meet.

The calibration process during this era was based on hardware adjustments. Basic measurements of temperatures,

pressures and rotational speeds were predominantly conducted in-vehicle. There was no on-board diagnostics capability or thermal management and ultimately, driveability was a product of the initial hardware selection.

Degradation of components over the vehicles lifetime would often demand “re-calibration” in a workshop.

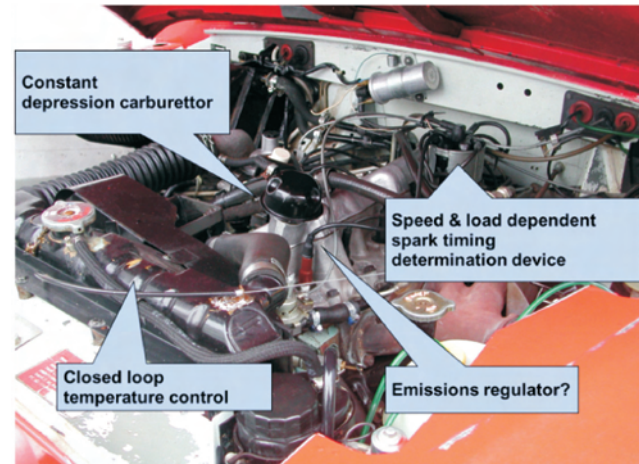


Fig. 1. Under the hood of a Land Rover from the late 1960’s

3. The present

The legislative requirements to lower exhaust emissions and improve OBD functionality have been the driving force in engine development over the last 30 years. The implementation of electronic control systems has been the main technology enabler.

Other customer driven requirements such as efficiency, quality, driveability, power density, etc. have an important role to play in the powertrain development process and contribute strongly towards brand identity. Hence, whilst these demands often conflict with one another, they cannot be discounted during the development process.

The key benefits of using electronic control system can be characterised by the following features:

- Full ‘online’ ECU access
- Adaptive control functions
- Sophisticated driveability functions



Fig. 2. Approximately 35% of calibration tasks are performed in vehicle today

- OBD (>50% of all functions)
- Ability to calibrate for specific emissions drive cycles (as required by legislation)
- Access to additional measurements in vehicle (ECU, CAN, temperatures and pressures, GPS, etc.)
- Ability to monitor degradation of vehicle components over lifetime
- Where necessary, it is possible to release software updates through dealer networks.

The complete engine calibration process can be split into the following four subtasks:

- Base engine and component protection
- Emissions and exhaust gas after treatment
- On-board diagnostics
- Driveability.

If we take a passenger car that meets the current (Euro V) emissions legislation as a contemporary example; we can examine the most common methodology and proc-

behaviour of automatic transmissions and vice versa. With the proliferation of electrification technologies, there are now further management systems integrated in the drivetrain. Apart from the battery and electric motor controllers, there are now also HCUs (Hybrid Control Unit), which determine the operating strategy in various driving situations. It is worth mentioning here, that complete vehicle control units have been implemented in heavy duty vehicles for many years. For example, modern tractors adapt their control strategy according to the status of the individual and aggregate load situations.

The explosion in the number of control units increases the necessity to network the control units together. This results in massive cross-dependencies of individual functions, or labels, which up until recently were only able to be dealt with separately and independently.

For example, the ability to power a vehicle with 100% electrical power cannot be simply assessed via the state of

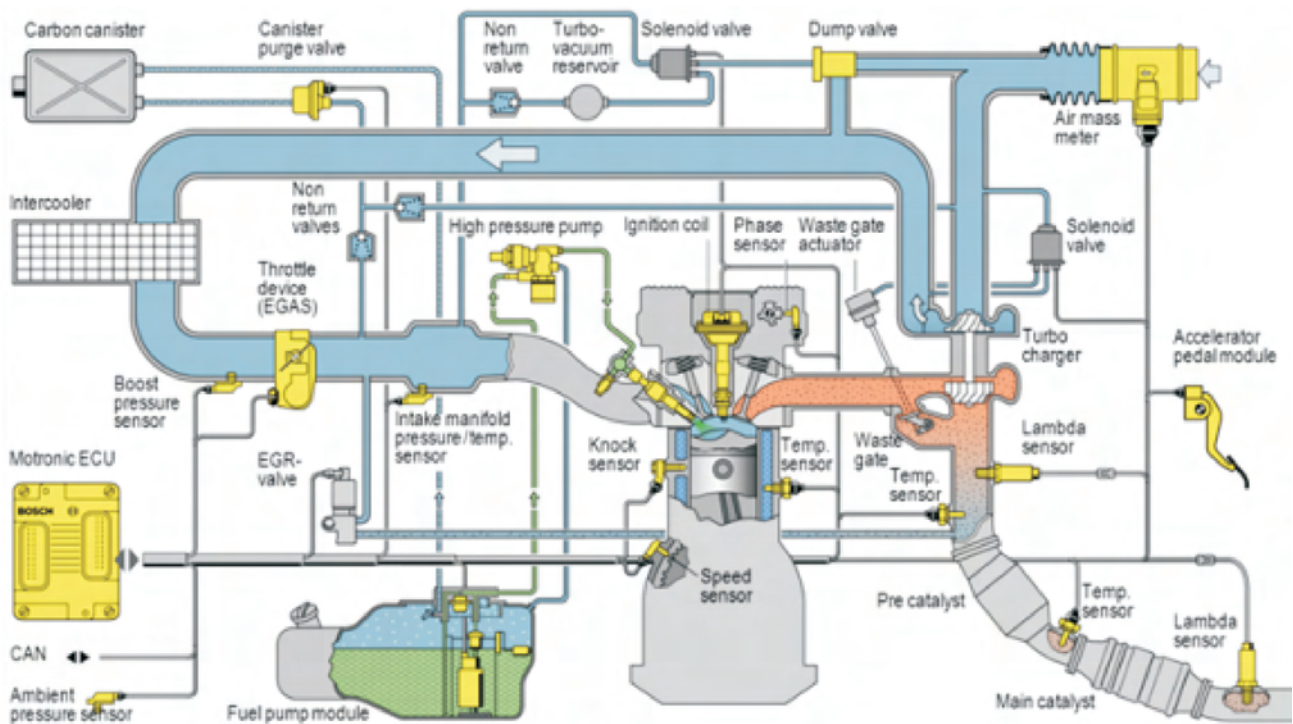


Fig. 3. The basic calibration components in a modern day automobile

esses used by engineers to optimise the aforementioned tasks.

3.1. Data management

For many years, the development processes for combustion engines and transmissions could be largely regarded as being independent of one another. The only points of contact in the total vehicle development process were the milestones for the delivery into the complete drivetrain.

In the mid-nineties, the introduction of the torque-based combustion engine control uncovered the cross-dependencies between ECU and TCU. If changes were made in the engine management system this had a knock-on effect on the shift

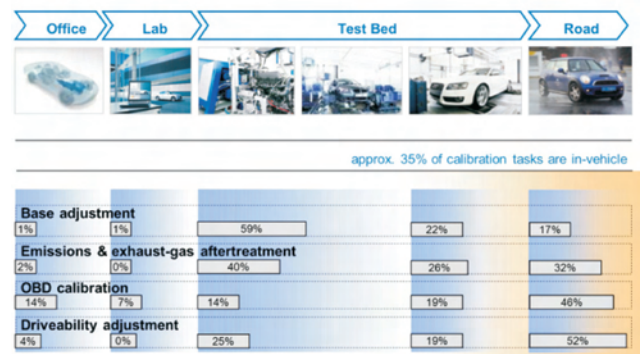


Fig. 4. Task split with breakdown of test environments

battery charge; but also by taking into account a possibly too low catalytic converter temperature, which would make the continuing use of the combustion engine necessary. The idle control and pull-away behaviour can also be controlled differently depending on the state of battery charge. Diagnostic functions in particular need to consider the aforementioned cross dependencies, because the emissions results depend heavily on the operating strategy selected. Finally, the operating strategy will need to be changed or adapted if a fault is detected and diagnosed.

In order to be able to react to these situations, it will be necessary to identify all cross-dependencies on a functional and label level, and to be able to guarantee that all project participants are at least aware of them.

A simple reactive behaviour by a data management system will, however, not be sufficient. At the very beginning of a project, all critical functions and labels should be uniquely identified and allocated to the calibrator who has responsibility for them. By doing this method, iterative loops in the development process and inaccurate calibration can be minimised or at best avoided at the beginning of a project.

Consequently, it is necessary to store all data sets from the various control units in a central database and to clearly allocate access rights to the individual project participants. A centralised and component-oriented data-

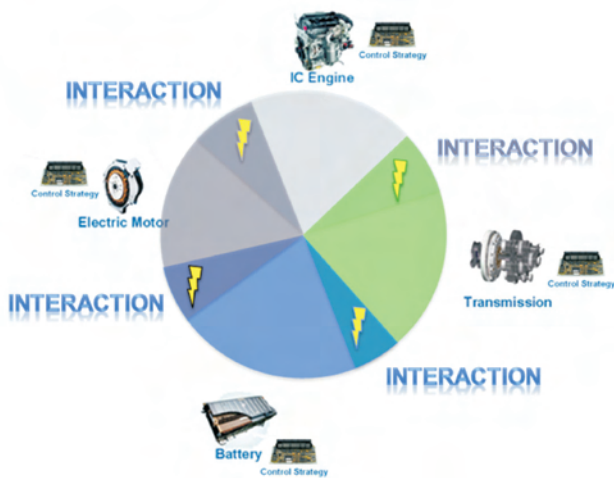


Fig. 5. Increased complexity and a high degree of co-dependency between subsystems is becoming the norm

base can also be called upon in future projects for purposes of pre-calibration. In order to increase the effectiveness of this solution, information concerning the source of the data sets should also be stored alongside information concerning the test plan used, the test strategy implemented and which modelling and optimization algorithm was used. If available, specific workflows and standards can also be stored alongside the data sets. When using model-based approaches, it is also important to store and reference any ECU models and plant models that were implemented [1].

3.2. Automated engine optimisation

Automated running of engine test beds has been around for some time and the introduction of this feature does not inevitably result in more efficient resource usage or shorter development times. Sometimes this has been referred to as “just enabling engineers to burn more fuel.” Hence, the data produced during automated test runs must be relevant to the project and of a high quality.

The conventional methodology takes an iterative approach, whereby an engineer will prepare a test case and run the experiments on the engine. Once the data has been produced, the engineer must take the time to carefully analyse the results and prepare a new test case before running the second iteration of the experiment, and so on, until a satisfactory dataset is produced or enough empirical data is collected to create an adequate model offline.

With simple adjustments to base engine calibrations, this iterative approach can be quite effective and fast. However, more commonly, the increased flexibility in modern engines means that this logical approach becomes incredibly time consuming and complex when dealing with multiple inter-reliant variables. An example of this would be a modern common rail diesel engine whereby the performance in the emissions region is a function of the following parameters:

- Boost pressure set-point and pre-control
- EGR set-point and pre-control
- Fuel rail pressure
- Pilot injection timing and separation
- Pilot injection fuel quantity
- Main injection timing and quantity
- Post injection timing and quantity
- Intercooler bypass and throttle set-point.

The interaction between these variables means that it can be very difficult to find a coherent calibration strategy.

A problem whereby design criteria are to be optimised for several target functions simultaneously depending on

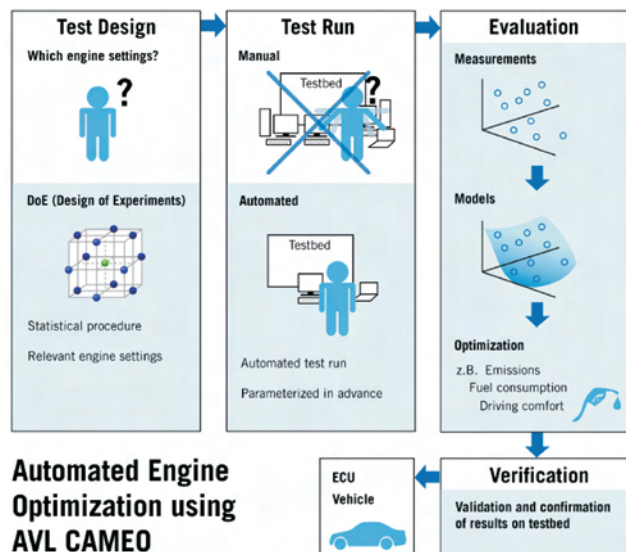


Fig. 6. The engine calibration process using AVL CAMEO

multiple constraints is called a multi-objective problem (MOP). If the target functions are in conflict with each other, then it is difficult to optimise all target functions simultaneously. Hence it is necessary to introduce the concept of “non-dominating individuals,” as long as there is no valid solution within the design space.

Usually, a multi-objective problem does not have a single such solution but a set of solutions, which can be described as a Pareto front [2].

Modern DoE software enables one to dramatically reduce the number of iterative steps taken when developing an emissions or base engine calibration using the ‘Adaptive Online’ DoE method. This is done by pre-screening the design space for operating points that lie within the specified

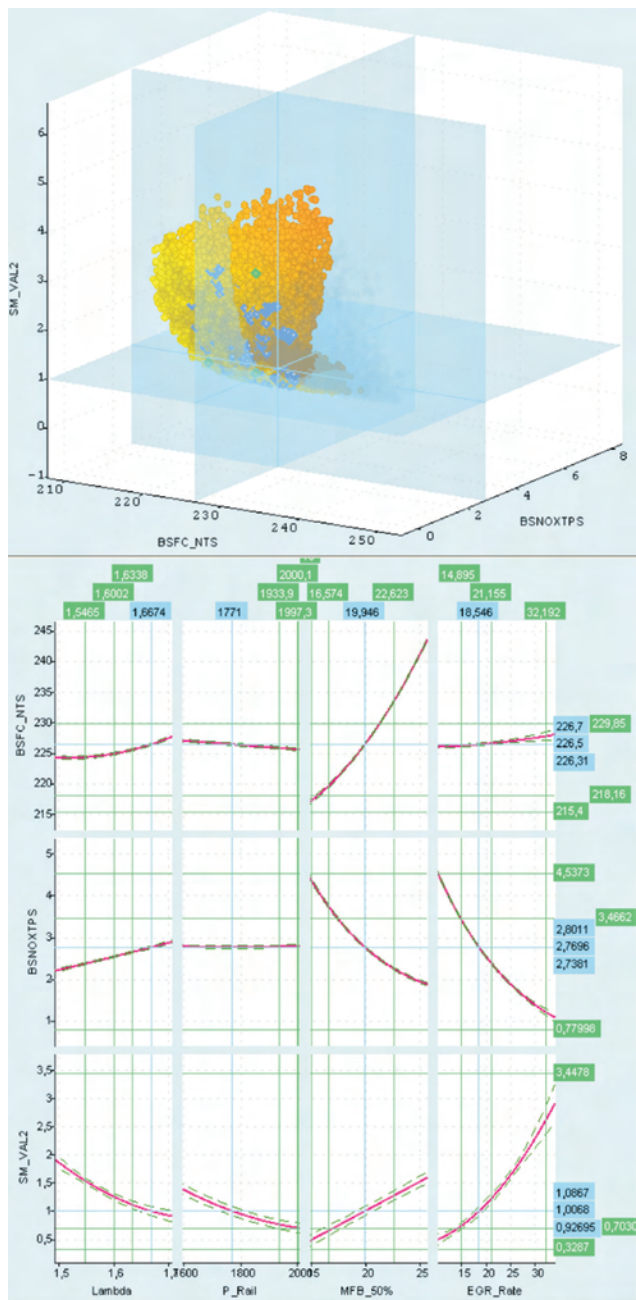


Fig. 7. Fast verification of the optimal points through interaction with the intersection graphic and Pareto front graphics

design criteria. By eliminating ‘bad zones’ from the design space, it can reduce the amount of ‘junk’ data generated during the automated test.

Once a design space has been screened and adjusted, the DOE software will proceed to start the test run. Once any statistical outliers have been eliminated, the generated data can be used to build models of the interacting variables. These models give the user the ability to quickly verify the measured operating points and search for an optimal strategy through examination of the Pareto front and intersection plots, see Fig. 7.

Through the skilled application of DoE tools and intelligent testing strategies, it is possible to reduce the time spent on the engine testbed by as much as 50%. The additional benefit of being able to run the testbed 24 hours a day with minimal supervision, whilst ensuring safe and stable operation, further enhances these savings.

3.3. Simulated emissions drive cycles

A fundamental element needed to further reduce development times via frontloading of projects is to simulate the emissions drive cycle in the engine test bed. Unlike the heavy duty industry, this process will never be used for the final emissions certification and homologation of the passenger vehicle. It is, with the correct preparation, possible to simulate an emissions drive cycle on high dynamic dynamometers and achieve repeatable emissions results that



Fig. 8. One of the recently updated CAMEO testbeds at BOSMAL

are directly comparable with chassis dyno tests using a robot driver and test vehicle.

The contemporary method of using test vehicles in the chassis dyno suffers from the following major drawbacks:

- Driver repeatability – often resolved by using robot drivers.
- Maturity of test vehicles – during the early stages of the projects, key components such as the final drive gear may not have been selected, or they are simply not available to use in the tests.
- Robustness of early prototype vehicles: These are often hand built vehicles and it is quite difficult to provide vehicles in adequate numbers that are comparable in terms of

hardware. Mechanical failure rates are often much higher during these earlier phases of development.

- 12 hour soak times are needed to allow the vehicle and transmission to cool down to reach the nominal environmental criteria before starting the test.
- High cost associated with producing fleets of early prototypes for chassis dyno tests.

Using the simulated emissions drive cycles on the testbed has the following benefits:

- Testing can start as soon as the engine hardware selection has been made and a stable coast down curve has been provided.
- Quick turnaround between emission cycle tests: By fast cooling the engine, it is normal to be able to produce approximately six emission drive cycles during an 8 hour shift.
- The simulations can cover different vehicle variants, automatic or manual transmissions and can assist in the selection of gear ratios.
- Depending on the maturity of the base engine calibration and engine hardware, it is possible to have a very high level of robustness and repeatability during this early testing phase, thereby enabling an emissions calibration freeze during the first few half of a development project.

With the increased focus on BSFC during the emissions development phase, it is common to hear the phrase; “every 10th of a gram of CO₂ counts on this project.” Therefore, it is increasingly necessary to carefully specify the shift schedule on automatic transmissions in combination with the emission calibration strategy, which can result in multiple iterative loops. Previously, it was possible to freeze the shift schedule very early on in the project because it was usually defined by the desired driveability characteristics. The need for a precise level of test repeatability is evident when searching for incremental reductions CO₂ and ultimately excludes the usage of human drivers during the early parts of the emissions drive cycle development phase. Human drivers are obviously still needed for the validation phase to prove the robustness of the emissions calibration prior to certification.

In Figure 9, a quick analysis was made during a recent calibration project to understand where the bulk of the increased fuel consumption was arising from on a dual clutch transmission (DSG) variant. In this specific case the difference between the two variants was less than 2 g/km of CO₂. By running two emissions drive cycles on the engine test bench with the same emissions calibration, one with a DSG transmission model and the other with a manual transmission model and comparing the results, it was immediately obvious that the engineering team needed to re-focus on improving the efficiency during the low speed phase of the drive cycle.

The answer to this question was provided in a few hours using the simulated drive cycle approach on an engine testbed. To make the same comparison using a single physical engine on a vehicle chassis testbed would have been prohibitively expensive and time consuming.

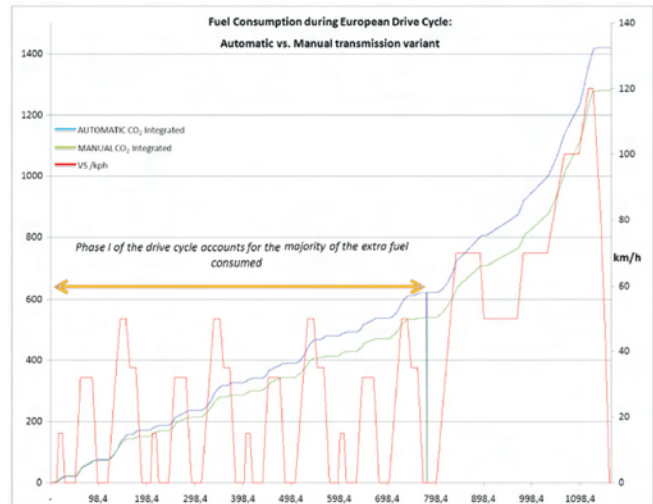


Fig. 9. Quick comparison made of two transmission variants using data from simulated emissions cycles in an engine test bed

3.4. Post-processing and function development within the calibration process

It is possible to pre-calibrate individual parts of the software functionality in the control unit in the office by using models of the various components of the drivetrain.

The operating strategy of ECUs are based upon multiple sources of information concerning the state of the vehicle, the ancillary system requirements, the transmission, the road conditions and the current torque requirements demanded by the driver.

Many characteristic parameters of these systems are not directly measurable in production vehicles because of the prohibitive price of the sensors, or their physical size and thus these values need to be derived either from observer or approximation based functions in the corresponding control units. These functions can be pre-calibrated in the office through the use of simulation and optimisation of measurement data gained from the drivetrain testbed, component test bench or from an instrumented vehicle. Common examples are clutch models, temperature models of various components, load state models for the batteries as well as ‘look-up tables’ that estimate the emissions for the exhaust after-treatment systems.

By transferring such calibration tasks into the office, it is possible to considerably reduce the time, effort and costs associated with these tasks. The complete system can now be analysed and calibrated based upon these replacement virtual or empirically derived models. An important feature of such simulation chains is also the analysis and development of operating strategies, which can be simply exchanged and compared with each other.

3.5. Importance of development environments

Today, as a whole, calibration engineers spend the majority of their time working in-vehicle. As previously discussed some of the workload is transferring into simulated environments, but most automakers require extensive verification work to be conducted in extreme environments.

A simple case whereby workload can be transferred into the engine test bed environment from the road early on the

development project (where test objects may not be available) is the initial driveability studies. For example, it is possible to start the calibration of the pedal maps on a high dynamic test bench by conducting simulated in-gear accelerations as described in Figure 11. The response characteristics of the air-path system and ultimately torque response can be measured with a degree of accuracy and repeatability that is difficult to achieve in-vehicle. Comparisons can be made between different drive-train solutions, such as gear ratios or wheel radius in combination with multiple simulated vehicle variants and infinite engine calibrations.

Combining this test methodology for driveability studies on the engine testbed with the aforementioned DoE packages and driveability rating systems further enhances one's capability to cover a wider scope of parameterisation and deliver finely tuned calibrations at a very early phase in the project.

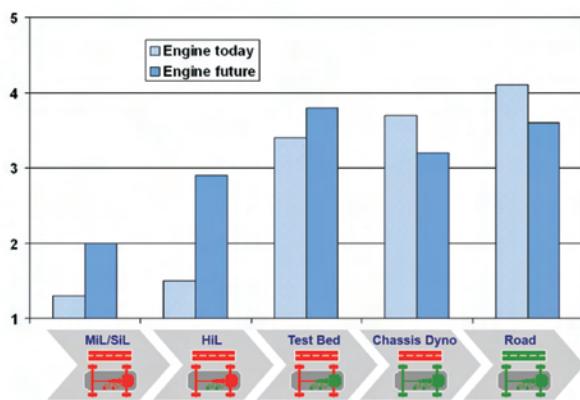


Fig. 10. The progression from road to laboratory

4. The future

4.1. Standardisation of processes

The calibration workflow can usually be divided into three main steps – independently of the calibration task and the drivetrain under consideration. In order to be able to efficiently execute these work steps; tools and methods that have a strong vertical consistency are required. This means that, depending on the task, there must be a chain of tools that integrate closely in order to provide the calibrator with the best possible support.

At the same time, there exists the requirement to be able to use the same tools on the same class of work steps; in order to reduce the number of different tools engineers must employ (horizontal equality).

4.2. Calibration of transient modes

As emissions regulations become more stringent in terms of total mass and permitted excursions above legislated values; then the original focus by the industry on controlling 'quasi' steady state emissions no longer holds true for all circumstances.

Feed-forward control algorithms are continuously being developed to limit the impact that heavy transients

through combustion modes and operating points can have on the integrated emission results. However, these forward control algorithms have a reputation for being notoriously difficult to calibrate, in part due to the requirement for a high degree of model accuracy and the necessity for these algorithms to adapt to the spread in hardware tolerances derived from production variance changes over vehicle lifetime.

Thus, with further proliferation of these model based transient control algorithms, the industry will need more powerful tools to aid in their calibration.

4.3. Flexibility of development environments

A clear pattern has emerged in the industry where we can observe a migration from the road to the testbed and simulation environments, and this is expected to continue in the future.

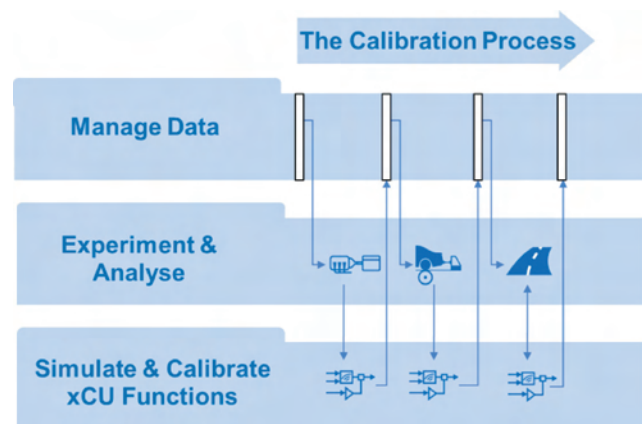


Fig. 12. The three main phases within the calibration process

To further enable successful transfer of work steps to these environments, the industry will need to focus on the following objectives:

- Unified testing throughout the entire development process
- Achieve best results for manoeuvre-based testing
- Verify and improve the overall quality of simulation.

4.4. In-vehicle measurement devices

The next set of emissions legislation sets out the requirement for passenger cars to fulfil the criteria for 'in-use performance ratios' (IUPR). These set boundary limits for regulated emissions that must not be exceeded by the production vehicles during their operating lifetime without setting a diagnostic fault code. For the calibration teams, this translates to a significant amount

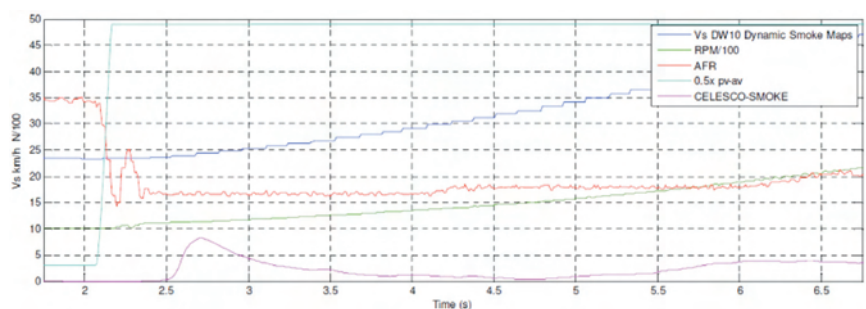


Fig. 11. Simulated vehicle response to a tip-in procedure in 3rd gear at 25 km/h

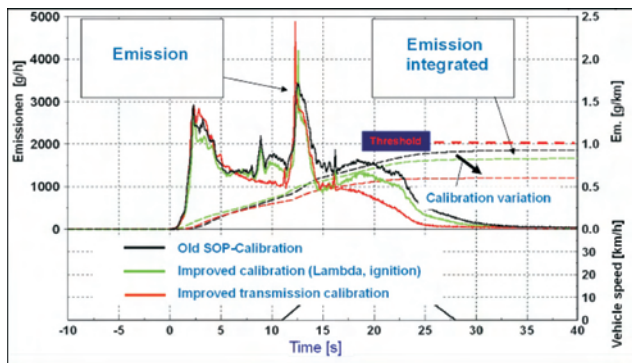


Fig. 13. The result on integrated exhaust emissions through the incremental increase in control over transient emissions excursions

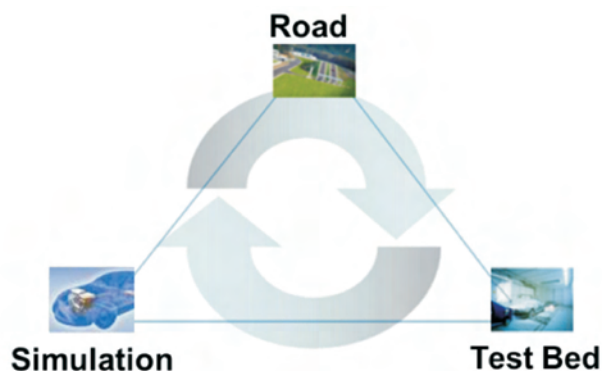


Fig. 14. Information is continuously transferred between the road, the test bed and simulation

of OBD verification work combined with the prerequisite to measure exhaust emissions on the road. These measurement devices must meet the following criteria:

- Flexibility
- Open system architecture
- Easy system integration.
- Durability and portability
- Ability to withstand severe shock and vibrations
- Operational in extreme environments
- Minimal volume and mass.
- Simplified installation & operation
- Data security
- Minimize required operating span gas
- Fast data acquisition and measurement device re-calibration.

5. Conclusions

Over the last century, calibration engineers have often been criticised for not adopting the more scientific methodologies used by their peers in other fields.

Collectively, the calibration community has started to regain this lost ground by developing more coherent strategies and processes. These have enabled it to undertake more efficient, predictable development projects in multi-disciplined environments.

History tells us that the volatility of the global crude oil price is something we will have to deal with again in the future. This instability in the energy markets has already demonstrated its' impact on the demand for hybrid electric



Fig. 15. AVL's solution for in-vehicle emissions measurement systems

vehicles over the last few years, particularly in the US market; thereby defining near term product strategy for automotive companies. Due to the high component and development on-cost of hybrid or plug-in vehicles; these vehicle choices becomes non-viable for around 14% of consumers when the gasoline price falls by approximately 25% [3].

The net-effect for calibration departments is that they will be put under increasing pressure to deliver projects with a higher degree of technical complexity in shorter timeframes in order to meet these fluctuating consumer demands.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Zach Ch., Schatz P., Kokalj G., Keuth N., Combé T.: Model based strategy optimisation for hybrid electric vehicles – 4th International Symposium on Development Methodology. Technical University of Darmstadt 2011.
- [2] Combé T., Steigerwald K., Hollerer P., Mitterecker H., Vogels M.S., Wimmeler Th.: New methods for dynamic emission calibration – 4th International Symposium on Development Methodology. Technical University of Darmstadt 2011.
- [3] Beresteanu A., Shanjun L.: gasoline prices, government support, and the demand for hybrid vehicles in the U.S. Department of Economics, Duke University, 2008.

Eike Martini, MEng. – Global Business Segment Manager Calibration Applications at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Mgr inż. Eike Martini – kierownik działu klienta globalnego aplikacji kalibracyjnych w AVL List GmbH, Graz, Austria.

e-mail: eike.martini@avl.com



Neil Coghlan, BEng, MPhil. – Calibration leader for a diesel passenger car meeting Euro V emissions at AVL List GmbH, Graz, Austria.

Mgr inż. Neil Coghlan – Główny specjalista ds. kalibracji silników ZS pojazdów klasy emulsyjnej Euro V w AVL List GmbH, Graz, Austria.

e-mail: ncoggy@gmail.com



BOSMAL – 40 years of automotive development

BOSMAL – 40 lat dla rozwoju motoryzacji

BOSMAL Automotive Research and Development Institute is located in Bielsko-Biala and has already been distinguished by its 40-year history. Since its foundation, BOSMAL has been associated with motorization technology. Its present scope of activities are development works, complex project services and the research activities for the automotive industry.

The Institute at present occupies an area of 8.3 hectares and is located in the northern part of the city, close to the intersection of through routes to the north and the west. BOSMAL houses a 130 250 cubic meter buildings complex which consists of a few halls and an office building. The usable space of these assets is 24 500 square meters (Fig. 1). At this time, BOSMAL is a limited liability company, engaging the services of around 300 employees.

The history of institute

At the beginning of the last century, decisions were taken by the national authorities concerning forming another pas-

Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL mieści się w Bielsku-Białej i szczyty się już 40-letnią historią. Od początków istnienia związany jest z techniką motoryzacyjną. Jego aktualnym zakresem działań są prace rozwojowe oraz kompleksowe usługi projektowe i badawcze dla przemysłu samochodowego.

Instytut zajmuje obecnie teren o powierzchni 8,3 ha i jest zlokalizowany w północnej części miasta, w pobliżu skrzyżowania dróg ekspresowych z północy i zachodu. Mieszczący się tu kompleks budynków o powierzchni 130 250 m³ składa się z kilku hal oraz budynku biurowego. Powierzchnia użytkowa tych obiektów wynosi 24 500 m² (rys. 1). BOSMAL jest obecnie spółką z ograniczoną odpowiedzialnością, zatrudniającą około 300 pracowników.

Historia Instytutu

Na początku lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia zapadły decyzje władz państwowych dotyczące utworzenia na południu kraju drugiego, po Warszawie, producenta



Fig. 1. BOSMAL Automotive Research and Development Institute in Bielsko-Biala
Rys. 1. Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej

senger car producer in the south of Poland (the second in the country, after Warsaw). The first stage of these actions was taking *Syrena* car production from Warsaw FSO to Bielsko-Biala (at the former Mechanical Equipment Manufacturing Company). The second stage was the signing, in December of 1971, of a licensing contract with the FIAT company, and the third stage was the creation of a multi-plant enterprise called Small Cars Plant in Bielsko-Biala in January 1972. The mass production of the complicated product which is the passenger car requires construction informed and developed through research, both in terms of the staff, and in the sense of technical equipment. On the day of the 15th of March, 1972 the Minister of the Machine Industry issued Directive No. 43/org/72, appointing BOSMAL Automotive Research and Development Center with its seat in Bielsko-Biala. The Center formally began its activity 1 April 1972 and was then the supplement FSM organization structure.

At that time, the basic tasks of OBR SM were various development works, current production construction services and works in the control-research sense. These last activities concerned a wide spectrum of materials, parts, car complexes and complete vehicles. In the first years of the Center's activity a significant impediment was locating certain organizational cells at five different sites throughout the city.

The first independent responsibility of OBR SM was drawing up construction of a vehicle for agricultural needs, based on the *Syrena* car. In a relatively short period of time,



Fig. 2. *Syrena* 105 B

Rys. 2. *Syrena* 105 B

new prototypes of the *Syrena* 104 Bosto car were established with universal passenger and carriage space character as well. After conducting the whole testing cycle and getting positive opinions, the car was led into serial production in FSM in 1974, as the 105 B model (Fig. 2).

samochodów osobowych. Pierwszym etapem tych działań było przeniesienie produkcji samochodów *Syrena* z warszawskiej FSO do działającej wówczas w Bielsku-Białej Wytwórni Sprzętu Mechanicznego. Drugim etapem było podpisanie w grudniu 1971 roku umowy licencyjnej z firmą FIAT, a trzecim utworzenie w styczniu 1972 roku wielozakładowego przedsiębiorstwa o nazwie Fabryka Samochodów Małolitrażowych w Bielsku-Białej. Masowa produkcja skomplikowanego wyrobu jakim jest samochód osobowy wymaga odpowiednio rozwiniętego zaplecza konstrukcyjno-badawczego zarówno pod względem kadrowym, jak i wyposażenia technicznego. Dnia 15 marca 1972 roku Minister Przemysłu Maszynowego wydał Zarządzenie nr 43/org/72, powołujące Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Samochodów Małolitrażowych (w skrócie OBR SM) BOSMAL z siedzibą w Bielsku-Białej. Ośrodek ten formalnie rozpoczął swoją działalność 1 kwietnia 1972 roku i stanowił wówczas uzupełnienie struktury organizacyjnej FSM.

Do podstawowych zadań OBR SM należały wówczas wszelkie prace rozwojowe, bieżąca obsługa konstrukcyjna produkcji oraz prace o charakterze kontrolno-badawczym. Te ostatnie dotyczyły szerokiego spektrum materiałów, części i zespołów samochodowych oraz kompletnych pojazdów. W pierwszych latach działalności Ośrodka istotnym utrudnieniem było rozmieszczenie poszczególnych komórek organizacyjnych w pięciu różnych punktach miasta.

Pierwszym samodzielnym zadaniem OBR SM było opracowanie konstrukcji pojazdu na potrzeby rolnictwa na bazie samochodu *Syrena*. W stosunkowo krótkim czasie powstały prototypy samochodu *Syrena* 104 Bosto o uniwersalnym osobowo-towarowym charakterze. Po przeprowadzeniu pełnego cyklu badań i uzyskaniu pozytywnych opinii samochód ten został w 1974 roku wprowadzony do seryjnej produkcji w FSM jako model 105 B (rys. 2).

Do kolejnych większych prac związanych z samochodem *Syrena* należało opracowanie i wdrożenie dwuobwodowego układu hamulcowego (1974 r.) oraz lepiej wyposażonego modelu 105 Lux (1975 r.).

Wkrótce po podpisaniu kontraktu licencyjnego na produkcję i sprzedaż samochodu *Fiat* 126 do Bielska-Białej zaczęła nadchodzić włoska dokumentacja techniczna. W OBR SM zorganizowano wówczas zespół specjalistów zajmujących się jej adaptacją i dalszym rozpracowywaniem do zakładów, które miały produkować poszczególne elementy samochodu licencyjnego. Laboratoria Ośrodka prowadziły badania materiałów i elementów przeznaczonych do stosowania w samochodzie licencyjnym. Z chwilą uruchomienia seryjnej produkcji samochodu *Polski Fiat* 126p (1973 r.) rozpoczęto prace nad pochodnymi wersjami tego pojazdu, mającymi większe możliwości przewozowe. Przy współpracy z warszawską Akademią Sztuk Pięknych powstały

The next, larger scope of work related to the Syrena car was drawing up and implementing a two-way braking system (1974) and a better equipped 105 Lux model (1975).

Soon after signing the license contract for *Fiat 126* production and sale to Bielsko-Biala, Italian technical documentation arrived on the scene. In OBR SM a team of specialists was organized, to be involved in its adaptation and further distribution to plants, which were to produce given elements of the. The Center's laboratories were conducting material tests and elements dedicated to be used in the car under license. At the moment of starting the serial production of *Polski Fiat 126p* (1973) work on derivative versions of the vehicle were initiated, having greater load carrying possibilities. Thanks to the Warsaw Academy of Fine Arts' cooperation, projects of a few such vehicles appeared. The first of these, as early as 1974, was production of a prototype of a delivery car called *Bombel* (Fig. 3). In the following years prototypes of the *Long* and *Estate* cars appeared, which stood out with their wheel base increased about 10 cm. It is necessary to add, that the Estate Car model was equipped with horizontal cylinders circuit motor. In OBR SM a few versions of vehicles for invalids were also made, which were put into production.

In the group of less known constructions, we find the Pingwin marking machine being drawn up on the basis of PF 126p, dedicated to painting road surface markings. One of the last studies which appeared on the basis of PF 126p model was a car with the open bodywork cabriolet type, equipped with the soft folding roof. The limited serial production of these cars was established with the



Fig. 3. Fiat 126p BOMBEL

Rys. 3. Fiat 126p BOMBEL

projekty kilku takich pojazdów. Jako pierwszy, już w 1974 roku, został wykonany prototyp samochodu dostawczego o nazwie Bombel (rys. 3).

W następnych latach powstały prototypy samochodów *Long* i *Combi*, które wyróżniały się zwiększonym o 10 cm rozstawem osi. Należy dodać, że model Combi wyposażono w silnik o poziomym układzie cylindrów. W OBR SM opracowano także kilka wersji pojazdów inwalidzkich, które weszły do produkcji.

Do mniej znanych konstrukcji należy znakowarka Pingwin opracowana na bazie PF 126p, przeznaczona do malowania znaków poziomych na jezdniach. Jednym z ostatnich opracowań powstałych na podstawie modelu PF 126p był samochód z otwartym nadwoziem typu kabriolet

wyposażony w miękki składany dach. Małoseryjną produkcję tych samochodów uruchomiono pod nazwą *Bosmal Cabrio* (rys. 4) w 1991 roku. Niemal cała produkcja tych pojazdów była wyeksportowana do krajów Europy Zachodniej.

W Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Samochodów Małolitrażowych powstał także całkowicie nowy samochód o nazwie *Beskid*. Prace wstępne rozpoczęto w 1981 roku, a pierwszy prototyp wykonano już w lipcu 1983 roku. Trzydrzwiowe nadwozie o długości 3,24 m miało nowatorską jednobryłową sylwetkę o bardzo dobrych właściwościach aerodynamicznych (rys. 5). Komora silnikowa pozwalała na stosowanie różnych silników o pojemności od 0,6 do 1,1 dm³,



Fig. 4. Bosmal Cabrio

Rys. 4. Bosmal Cabrio

Bosmal Cabrio name (Fig. 4) in 1991. Almost the whole production lot of these vehicles was exported to the countries of Western Europe.

In BOSMAL Automotive Research and Development Center there also appeared a brand new car called *Beskid*. Initial works were begun in 1981, and the first prototype was already made by July 1983. The bodywork with three doors, 3.24 m long, had an innovative mono-body silhouette with very good aerodynamic properties (Fig. 5). The engine chamber allowed the use of different motors with capacities from 0.6 to 1.1 cubic decimeters, placed crossways or lengthways. The vehicle also had modern chassis sets. The production of the vehicle was never initiated, but the experience gained was used in different projects.



Fig. 5. Beskid

Rys. 5. Beskid

Privatization

In ‘the new political and economic reality’ after the year 1989, the Small Cars Plant in Bielsko-Biala was privatized and taken over by the Fiat concern, and OBR SM BOSMAL remained a national institution subordinate to the current Minister of Economy, Labor and Social Policy, collaborating with the Scientific Research Committee. The profile of the Center’s activity was adjusted to new conditions and as an independent research and development unit it had ever more customers, both within the country and abroad. The Center’s scientific activities advanced as well.

All the time, changes to the legal situation in the scope of privatization of national enterprises was making this process difficult and prolonging it. A privatization motion for BOSMAL was put forward twice to the Ministry of Economy. The first time in December 2004, and once again on 6 June 2006. In November 2007 the Ministry of Economy chose the consulting firm, which carried a the pre-privatization analysis, finishing in September 2008. A few months later the negotiation team was announced, whose task was to work over the stated position of the Center for negotiations with the government entity. Further delays were caused by the actions of opponents to privatization. The next precise actions on the subject of privatization occurred in 2010. On the day of 1 March that year, the Ministry of Economy appointed a minister for OBR SM BOSMAL’s direct privatization affairs, and 1 May 2010 a contract concerning changing the company status from BOSMAL Automotive Research and Development Center into BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd was signed. A few days later the motion was put forward in the Local Law Court (VIII Economical Department) in Bielsko-Biala about removing OBR SM BOSMAL from the National Court’s Register, and a resolution concerning the aforementioned Court on striking the record was issued on 24 June 2010.

The Institute was paying further installments, according to the Contract, and at the beginning of 2012 the Institute’s

umieszczonych poprzecznie lub wzdłużnie. Pojazd otrzymał także nowoczesne zespoły podwoziowe. Produkcji tego pojazdu nie podjęto, ale zdobyte doświadczenie wykorzystano w innych pracach.

Prywatyzacja

Po roku 1989, w „nowej rzeczywistości” polityczno-gospodarczej Fabryka Samochodów Małolitrażowych została sprywatyzowana i przejęta przez koncern Fiata, a OBR SM BOSMAL pozostał instytucją państwową podległą ówczesnemu Ministrowi Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej, współpracującą z Komitetem Badań Naukowych. Profil działania Ośrodka został dostosowany do nowych warunków i jako niezależna jednostka badawczo-rozwojowa pozyskiwał on nowych klientów z kraju i zagranicy. Prowadzono także działalność naukową.

Zmieniająca się sytuacja prawna w zakresie prywatyzacji przedsiębiorstw państwowych utrudniała i znacznie wydłużała powyższy proces. Wniosek prywatyzacyjny do Ministerstwa Gospodarki BOSMAL składał dwukrotnie. Pierwszy raz w grudniu 2004 roku i ponownie 6 czerwca 2006 roku. W listopadzie 2007 roku Ministerstwo Gospodarki wybrało firmę konsultingową, która przeprowadziła analizę przedprywatyzacyjną zakończoną we wrześniu 2008 roku. Kilka miesięcy później powołano zespół negocjacyjny, który wypracował odpowiednie stanowisko Ośrodka do negocjacji ze stroną rządową. Kolejne opóźnienia spowodowały działania przeciwników prywatyzacji. Dalsze konkretne działania w zakresie prywatyzacji nastąpiły w 2010 roku. Dnia 1 marca tegoż roku Ministerstwo Gospodarki powołało pełnomocnika do spraw prywatyzacji bezpośredniej OBR SM BOSMAL, a 1 maja 2010 roku nastąpiło podpisanie umowy dotyczącej oddania Ośrodka do odpłatnego korzystania spółce pracowniczej o nazwie Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL – sp. z o.o. Kilka dni później złożono wniosek w Sądzie Rejonowym (VIII Wydział Gospodarczy) w Bielsku-Białej o wykreślenie OBR SM BOSMAL z Kra-

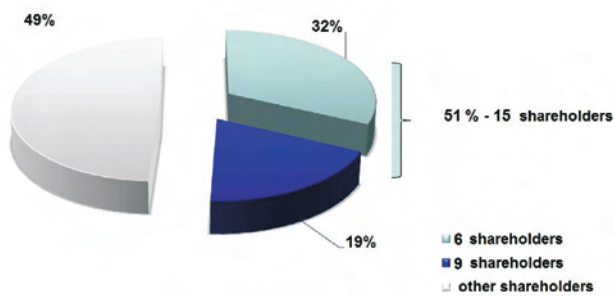


Fig. 6. BOSMAL's capital structure
Rys. 6. Struktura kapitału Instytutu BOSMAL

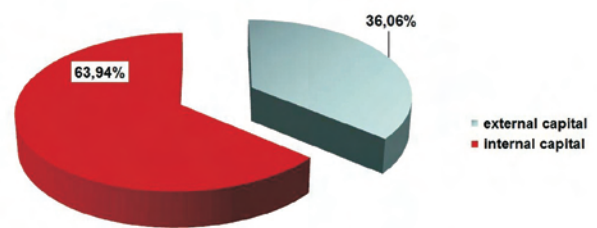


Fig. 7. BOSMAL's external capital
Rys. 7. Kapitał zewnętrzny Instytutu BOSMAL

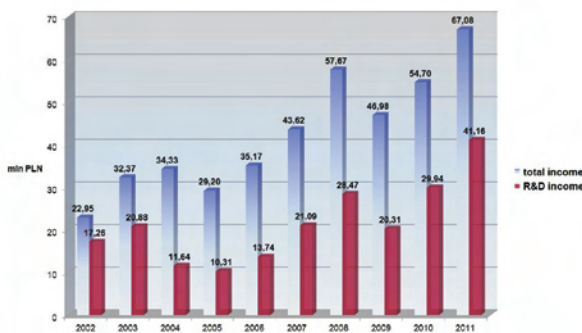


Fig. 8. BOSMAL's income for years 2002-2011
Rys. 8. Przychody BOSMALu w latach 2002-2011 BOSMAL's income for years 2002-2011

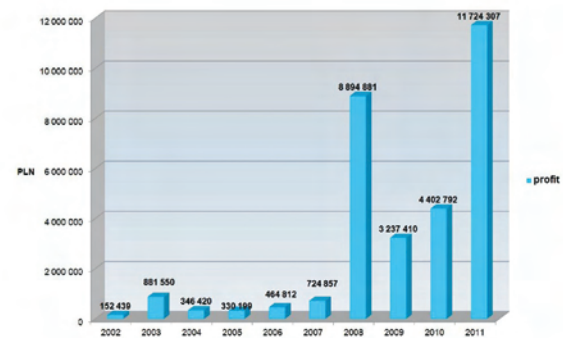


Fig. 9. BOSMAL's profit for years 2002-2011
Rys. 9. Zysk BOSMALu w latach 2002-2011

Management Board turned to negotiate a contract on moving the property ownership of former OBR SM to the Institute. The contract was signed on 24 April 2012.

BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd – the present situation

The Institute Management Board, consisting of four persons, whose composition has not changed since 2010, is under the direction of President and CEO, Antoni Świątek DEng, DSc. The Supervisory Board consists of five persons, and its Chairperson is Professor Jerzy Merkisz, DEng, DSc. The Basic capital of the company is PLN 5 150 000.

At the end of 2011 the company had 315 shareholders, and a percentage-based company capital structure shown in Figures 6 and 7. The graphs shown in Figures 8 and 9 present BOSMAL incomes and profits over the period of the last ten years. From the incomes in general, incomes coming from the research and development activity were generated.

The Institute's activity may be estimated by its customers and completed works data. In 2011, the number of active customers amounted to 515 (not including ASO Customers and those buying sets for driving lessons). There were 2428 offers made, out of which 1354 orders/contracts were put into realization, concerning making different ranges of works and products, which was 55.7% of offer action capacity. The average number of orders realized for each customer is almost 3.

owego Rejestru Sądowego, a postanowienie ww. Sądu o wykreśleniu wydane zostało 24 czerwca 2010 roku.

Instytut wpłacał kolejne raty zgodnie z Umową, a z początkiem 2012 roku Zarząd Instytutu przystąpił do negocjowania umowy przeniesienia własności majątku byłego OBR SM na Instytut. Podpisanie tej umowy nastąpiło 24 kwietnia 2012 roku.

Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL sp. z o.o. – stan obecny

Czteroosobowy Zarząd Instytutu działa od 2010 roku w niezmiennym składzie, pod kierunkiem Prezesa dr hab. inż. Antoniego Świątko. Rada Nadzorcza składa się z pięciu osób, a jej Przewodniczącym jest prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz. Kapitał zakładowy firmy wynosi 5 150 000 złotych. Na koniec 2011 roku spółka liczyła 315 udziałowców, a procentową strukturę kapitału spółki przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przychody oraz zyski BOSMAL-u w okresie ostatnich dziesięciu lat. Z przychodów ogółem zostały wydzielone przychody pochodzące z działalności badawczo-rozwojowej B+R.

Działalność Instytutu może być oceniana przez liczbę klientów oraz zrealizowanych prac. W roku 2011 liczba aktywnych klientów wyniosła 515 (nie wliczając klientów ASO oraz klientów kupujących zestawy do nauki jazdy). Wystawionych zostało 2428 ofert, z czego zrealizowano

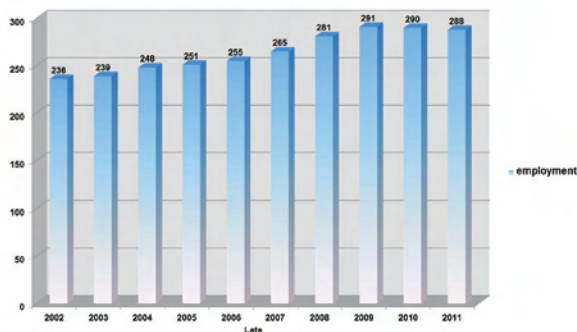


Fig. 10. Average employment in BOSMAL for years 2002-2011
 Rys. 10. Średnie zatrudnienie w BOSMALu w latach 2002-2011

From many years the foreign market sale increase is registered both in terms of value, and in relation to sale value in general. In 2010 the foreign market sales share was already 55% of general sales.

The employment state for the day of 31 December 2011 was 289 employees. The employment structure according to education is presented as follows. The most numerous group with 178 persons (62%) are employees with university education, within this group one holder of a postdoctoral degree, 13 persons with doctoral title and 164 people with the titles of master's degree, engineering degree or engineering faculty membership. The employees group with secondary education are 86 persons, which is 29.4% of all those employed. In the remaining group of 25 people are those with vocational secondary education.

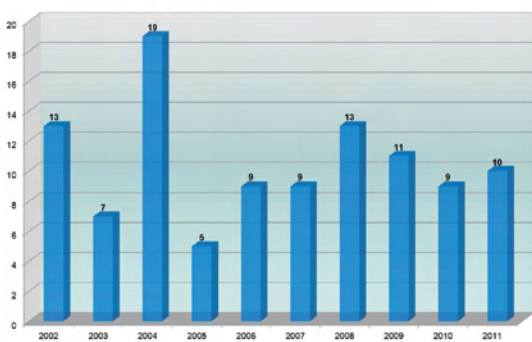


Fig. 12. Number of foreign publications for years 2002-2011
 Rys. 12. Liczba publikacji zagranicznych pracowników BOSMALu w latach 2002-2011

The average employment in the last ten years is shown in the graph in Figure 10: a gradual increase in the number of employees is visible in the years 2002-2009 and a certain stabilization within following years is also visible.

The OBR SM buildings being taken over later by the Institute, which were built in the period of 1973-1978 required partial renovations, and also modernization concerning changes in range of activity and the laboratories' equipment. Systematic investments adjusting research equipment are also necessary, due to changeable regulations and customers' requirements. On account of this, in the last

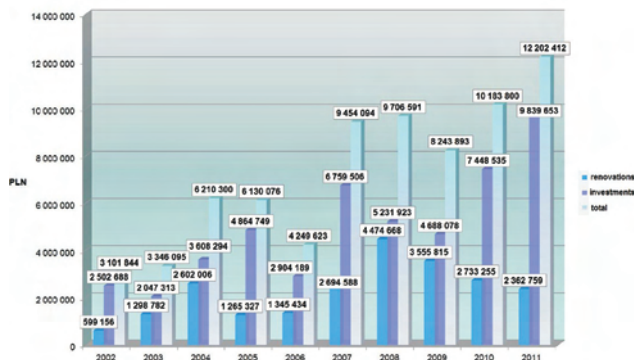


Fig. 11. Investments and renovations in BOSMAL for years 2002-2011
 Rys. 11. Wartość inwestycji i remontów w BOSMALu w latach 2002-2011

1354 zamówienia/umowy na wykonanie różnorodnych prac oraz wyrobów, co stanowiło 55,7% sprawności akcji ofertowej. Średnia liczba zrealizowanych zamówień przypadających na jednego klienta wynosi prawie 3. Od wielu lat odnotowywany jest wzrost sprzedaży zagranicznej zarówno wartościowo, jak i w stosunku do wartości sprzedaży ogółem. W roku 2010 sprzedaż zagraniczna stanowiła już 55% sprzedaży ogółem.

Stan zatrudnienia na dzień 31 grudnia 2011 roku wynosił 289 pracowników. Struktura zatrudnienia według wykształcenia przedstawia się następująco. Najliczniejszą grupą liczącą 178 osób (62%) są pracownicy z wyższym wykształceniem, w tym jedna osoba z tytułem doktora habilitowanego, 13 osób z tytułem doktora oraz 164 osoby z

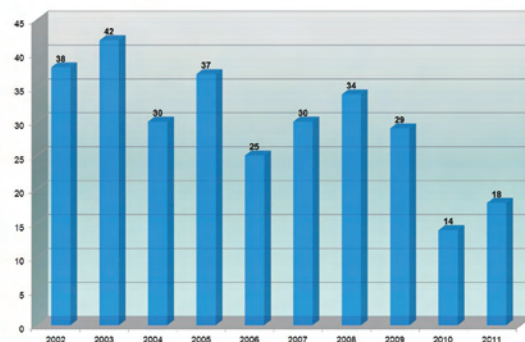


Fig. 13. Number of national publications for years 2002-2011
 Rys. 13. Liczba publikacji krajowych pracowników BOSMALu w latach 2002-2011

tytułami magistra inżyniera, magistra lub inżyniera. Grupa pracowników ze średnim wykształceniem liczy 86 osób, co stanowi 29,4% ogółu zatrudnionych. Pozostałe 25 osób ma wykształcenie zawodowe. Średnie zatrudnienie w ostatnim dziesięcioleciu przedstawiono na rys. 10. Z jego analizy można zauważyć stopniowy wzrost liczby pracowników w latach 2002-2009 oraz pewną stabilizację w następnym latach.

Obiekty OBR SM przejęte później przez Instytut, które zbudowane zostały w latach 1973-1978 wymagały częściowych remontów, a także modernizacji ze względu na zmiany

ten years substantial amounts of money were dedicated for renovation and investments. The size of this expenditure is shown in Figure 11.

Both OBR SM and the Institute engaged in scientific activity, and the activity metric in this field are employees' publications. In the period of 2002-2011, 402 of our employees' publications appeared. In that number are 105 foreign publications (Fig. 12) and 297 national ones (Fig. 13).

The Institute's current capabilities

The Institute specializes in making both research-development and construction works, mainly in the motorization field. The dominating activities are obviously research works, which include:

– engine testing

Wide research possibilities in the range of combustion engines may be divided into four issue groups: development tests of new constructions of car engines and engines dedicated to be used off road in the European, Asian and USA markets, production engines tests, tests of engines powered with different liquid and gaseous fuels, blends of fuels and

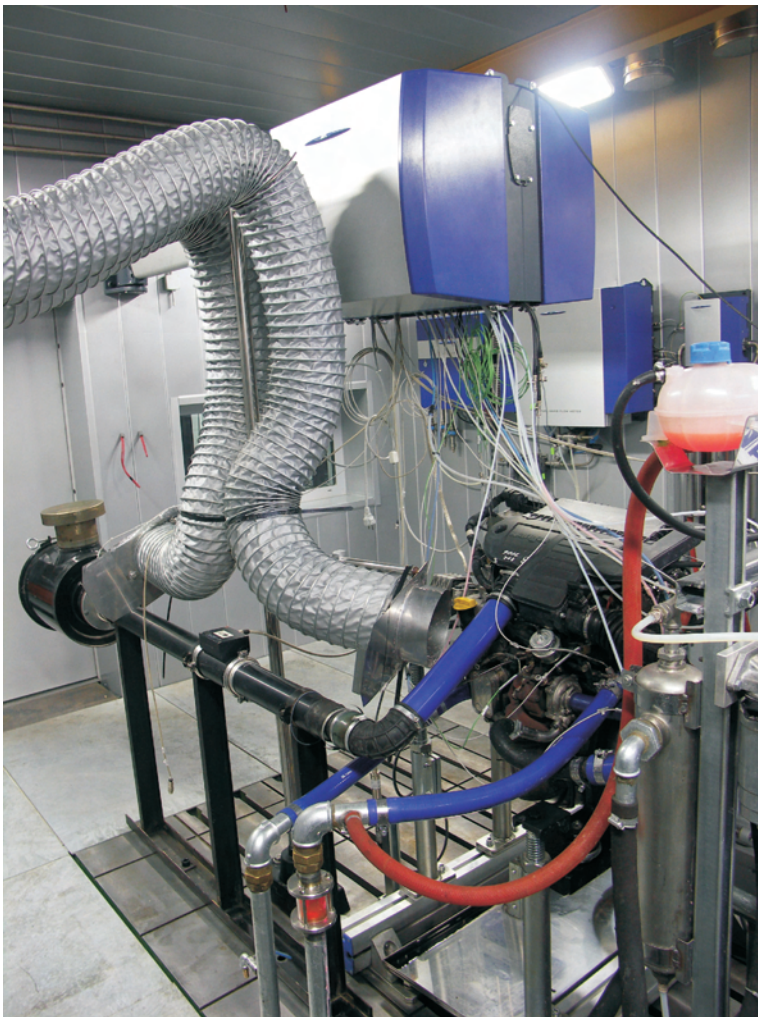


Fig. 14. Engines research test stand
Rys. 14. Stanowisko do badań silników

w zakresie działalności i wyposażenia poszczególnych laboratoriów. Niezbędne też są systematyczne inwestycje umożliwiające dostosowanie wyposażenia badawczego do zmieniających się norm i wymagań klientów. Z tych względów w ostatnim dziesięcioleciu na cele remontowe i inwestycyjne przeznaczano znaczne kwoty. Wielkość tych nakładów przedstawiono na rys. 11.

Zarówno OBR SM, jak i Instytut prowadziły działalność naukową, a miarą aktywności w tej dziedzinie są publikacje pracowników. W latach 2002-2011 ukazały się 402 publikacje naszych pracowników. W tej liczbie mieści się 105 publikacji zagranicznych (rys. 12) oraz 297 publikacji krajowych (rys. 13).

Aktualne możliwości Instytutu

Instytut specjalizuje się w wykonywaniu prac badawczo-rozwojowych oraz prac konstrukcyjnych, głównie na rzecz przemysłu motoryzacyjnego. Dominującą działalnością są oczywiście prace badawcze, do których należą:

– badania silnikowe

Szerokie możliwości badawcze w zakresie silników spalinowych można podzielić na cztery grupy zagadnień: badania rozwojowe nowych konstrukcji silników samochodowych i silników przewidzianych do zastosowań pozadrogowych na rynkach europejskich, azjatyckich i USA, badania silników produkcyjnych, badania silników zasilanych różnymi paliwami ciekłymi i gazowymi, mieszankami tych paliw oraz paliwami alternatywnymi, badania emisji związków szkodliwych spalin.

W ramach pierwszej grupy zagadnień, we współpracy z czołowymi światowymi producentami samochodów i silników spalinowych, prowadzone są badania nowych konstrukcji silników przewidzianych do spełnienia przyszłych norm emisji, badania procesu spalania, pomiary emisji gazowych związków szkodliwych spalin oraz cząstek stałych w zakresie ich masy i liczby, kalibracje i regulacje systemu sterowania silnikiem (ECU) i układu zasilania paliwem, badania trwałościowe i specjalistyczne (rys. 14), badania w zakresie kontroli jakości produkcji, optymalizacje układów katalizacyjnego oczyszczania spalin (TWC, DOC, DPF, SCR), badania kwalifikacyjne silników i ich podzespołów, współpraca przy uruchomieniu produkcji nowych silników z ich producentami, badania rozwojowe i kwalifikacyjne olejów silnikowych, prace związane z rozwojem silników dostosowanych do spalania paliw alternatywnych (specjalnych), a także dodatków do paliw i silników przeznaczonych na nowe rynki (Azja, USA).

W ramach badań silników produkcyjnych wykonywane są badania jakościowe i kontrola zgodności produkcji COP oraz oferowana jest pomoc w kwalifikacji nowych części i podzespo-

alternative fuels, engine oils, emission tests of exhaust gases and toxic compounds.

Within the first group, in co-operation with leading worldwide car and combustion engine producers, research is performed concerning new engine constructions dedicated to fulfill future emission norms, consumption process tests, emission measurements of exhaust gases, toxic compounds and solids particulate matter, in the range of their mass and number, calibrations of the engine control unit (ECU) and fuelling system, durability and specialist tests (Fig. 14), tests in the range of quality production control, optimization of catalytic exhaust gas treatment (TWC, DOC, DPF, SCR), engine qualification tests and their subassemblies, collaboration at the stage of activating new engines' production with their producers, development and qualification tests of motor oils, works associated with engines development adjusted to consumption of alternative (special) fuels, and also additions to fuels and engines dedicated for new markets (Asia, USA).

In the range of production engines tests there are qualification tests and the (COP) production compatibility control being done, and help is being offered on new parts' qualifications and engines subassemblies, and there are being done research over stabilized product development for engines producers.

In the group of fuels and engines oils tests are: alternative fuels tests, development tests associated with fuel additives, biofuel tests and tests of new oil types and validation tests of engine oils.

As far as fuels combustion tests are concerned (Fig. 15) development studies connected with the reduction of emissions of gaseous compounds and particulate matter, with CO₂ emission reduction from SI and CI engines are carried out, production compatibility control (COP) and other quality tests, homologation/certification (together with homologation institutions), fuel consumption tests, fuels emission tests while doing vehicle fleet testing, tests of exhaust gas aftertreatment systems (DOC, DPF, TWC, SCR), LPG/CNG system tests and tests of emission of toxic compounds for conventional and alternative fuels.

– heat exchanger tests

In the scope of heat exchanger tests (Fig. 16) tests of oil and air radiators, heaters, intercoolers, condensers, thermostats and fans are performed. In co-operation with leading car heat exchangers producers, the laboratory participates in development studies associated with drawing up new types of heat exchangers needed to fulfill requirements specified not only by vehicle constructors, but also requirements concerning toxic compounds emission reduction, CO₂ emissions reduction, fuel consumption

łów tych silników, a także prowadzone są prace nad stałym rozwojem produktu dla producentów silników.

Na badania paliw i olejów silnikowych składają się: badania paliw alternatywnych, prace rozwojowe związane z dodatkami do paliw, badania biopaliw oraz badania nowych typów olejów i badania walidacyjne olejów silnikowych.

W ramach badań emisji spalin (rys. 15) prowadzone są prace rozwojowe związane z ograniczaniem emisji związków gazowych i cząstek stałych oraz ograniczania emisji CO₂ z silników ZS i ZI, kontrola zgodności produkcji (COP) oraz inne testy jakości, homologacje/certyfikacje we współpracy z instytucjami homologacyjnymi, badania zużycia paliwa, testy emisji spalin podczas badań flot pojazdów, badanie systemów oczyszczania spalin (DOC, DPF, TWC, SCR), badania systemów LPG/CNG oraz badania emisji związków szkodliwych dla paliw konwencjonalnych i alternatywnych.

– badania wymienników ciepła

W zakresie badań wymienników ciepła (rys. 16) prowadzone są badania chłodnic powietrza i oleju, nagrzewnic, intercoolerów, kondensatorów, termostatów oraz wentylatorów. We współpracy z czołowymi producentami samochodowych wymienników ciepła laboratorium uczestniczy w pracach rozwojowych związanych z opracowaniem nowych typów wymienników niezbędnych do spełnienia wymagań określonych nie tylko przez konstruktorów pojazdów, ale również wymagań dotyczących ograniczenia emisji związków szkodliwych w gazach spalinowych, ograniczenia zużycia paliwa i emisji CO₂ oraz optymalizacji sprawności układu napędowego pojazdu. Prowadzone są testy: środowiskowe, temperaturowe, odporności na szoki termiczne, wydajności cieplnej, ciśnieniowe, starzeniowe, korozyjne, erozyjne, emisji węglowodorów i freonów, wibracyjne, akustyczne



Fig. 15. Chassis dynamometer in the climatic chamber
Rys. 15. Hamownia podwoziowa w komorze klimatycznej

reduction and optimization of vehicle driving circuit efficiency. The following tests are carried out: environmental, temperature, resistance for thermal shocks, thermal output, pressure, ageing, corrosion, erosion, emission of hydrocarbons and freons, acoustic, tests concerning vibration and thermovision. Both tests according to norms drawn up by particular producers of cars and test methods based on BOSMAL own experience are performed.

– material tests

These tests (Fig. 17) are performed on metals, metallic alloys and sintered metals, plastics tests, rubbers, foams and coating materials (woven fabrics, leather, leather-like materials), tests of oil products (fuels, oils, grease, radiator fluids, brake working fluids, anaerobic adhesives, sealing masses, other materials), corrosion resistance tests of galvanic and painted coatings (tests for corrosion, thickness, scratch resistance), chemical and physicochemical tests.



Fig. 17. Material laboratory

Rys. 17. Laboratorium materiałowe

– test stands of parts and car complexes research

Using test stands for parts and entire cars, complex research is carried out, including vibroacoustics tests, resistance tests on a road simulator (Fig. 18), test stand research of car complexes and parts, measurements and registration under stationary and tractive conditions, component resistance and durability tests, vibration tests, static and dynamic tests of parts under torsion, gearbox durability tests, brakes tests, measurements on threaded connectors and tests of hydraulic conduits.

– vehicle road testing

The road testing laboratory is involved in evaluations of vehicle functionality, and assessments of parts, car complexes, steerability and passenger car stability tests, durability and EOBD system reliability tests, traction systems tests, among others, ABS, ASR, vehicle tests while sliding (Fig. 19), vehicle tests when approaching a road, vehicle tests



Fig. 16. Test stands for heat exchangers tests

Rys. 16. Stanowiska do badań wymienników ciepła

oraz termowizyjne. Wykonywane są testy według norm opracowanych przez poszczególnych producentów samochodów oraz metod badawczych opartych na własnych doświadczeniach BOSMAL.

– badania materiałowe

Laboratorium materiałowe (rys. 17) prowadzi badania metali, stopów metali i spieków, badania tworzyw sztucznych, gum, pianek i materiałów pokryciowych (tkaniny, skóry, wyroby skóropodobne), badania produktów naftowych (paliwa, oleje, smary, płyny do chłodnic, płyny hamulcowe, kleje beztlenowe, masy uszczelniające, inne materiały), badania odporności korozyjnej powłok galwanicznych i malarskich (testy na korozję, grubość, odporność na zarysowanie) oraz badania chemiczne i fizykochemiczne.

– badania stanowiskowe części i zespołów samochodowych

Wykonywane są wszechstronne badania stanowiskowe części i zespołów samochodowych, w tym badania wibroakustyczne, badania wytrzymałościowe na symulatorze drogi (rys. 18), stanowiskowe badania zespołów i części samochodowych, pomiary i rejestracje w warunkach stacjonarnych i trakcyjnych, testy wytrzymałościowe i trwałościowe komponentów, testy wibracyjne, statyczne i dynamiczne próby skręcania części, badania trwałościowe skrzyń biegów, badania hamulców, pomiary w połączeniach gwintowych oraz badania przewodów hydraulicznych.

– badania drogowe pojazdów

Laboratorium badań drogowych wykonuje oceny funkcjonalności samochodów, części, zespołów samochodowych, badania kierowności i stateczności samochodów osobowych, badania trwałości i niezawodności systemów EOBD, badania systemów trakcyjnych, m. in. ABS, ASR, badania pojazdu podczas poślizgu (rys. 19), badania pojazdu podczas podjazdu, badania pojazdów w wysokich i niskich



Fig. 18. MTS road simulator
Rys. 18. Symulator drogi MTS

at high and low temperatures, vehicle gas tightness tests, mileage tests, durability and fatigue of parts, complexes and cars, fuel consumption tests, engine oil, gear reaction runaway and in certain gears; the effectiveness of functioning brake operator circuits and the ability to assemble parts are checked, moreover the temperature and pressure distribution in chosen circuits (brake operator, exhaust, engine cooling and lubrication, heating), resistance to motion, accelerated resistance tests of drive transfer complex and analyses with determination of the cause of faults present are performed.

– **electro-technical, electronic and photometric**

Environmental factors resistance tests of electrical and electronic elements are carried out, as well as testing of subassemblies of machines and devices, tests of electro-insulating materials, durability tests, thermal shocks (hydrous) for electronic elements and parts being assembled in vehicles (e.g. electronic detectors, heat exchangers), windowpane tests (Fig. 20).

– **metrological measurements**

The metrological laboratory makes precise contact and contact-free geometric measurements (Fig. 21), shape devia-

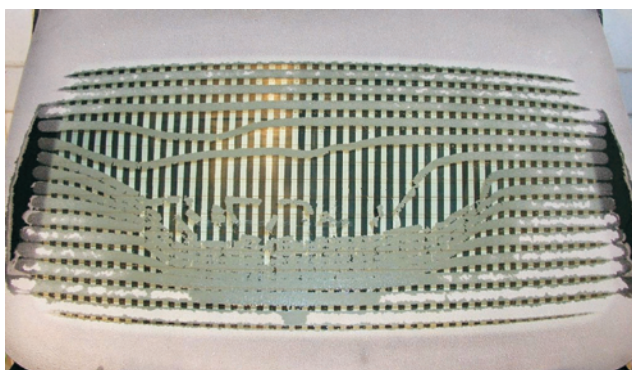


Fig. 20. Window panes tests
Rys. 20. Badanie szyb pojazdów

temperaturach, badania szczelności pojazdów, badania przebiegowe, trwałościowo-zmęczeniowe części, zespołów oraz samochodów, badania zużycia paliwa, oleju silnikowego, rozpędzanie przez biegi i na poszczególnych biegach. Sprawdza się skuteczność działania układów hamulcowych i montowalność części, bada się rozkład temperatury i ciśnienia w wybranych układach (hamulcowym, wydechowym, chłodzenia i smarowania silnika, ogrzewania), opory ruchu, wykonuje się przyspieszone badania wytrzymałościowe zespołu przeniesienia napędu oraz analizy i ustalania przyczyn



Fig. 19. Trajectory for traction systems tests
Rys. 19. Tor do badań systemów trakcyjnych

występowania usterek.

– **badania elektrotechniczne, elektroniczne i fotometryczne**

Wykonywane są badania odporności na czynniki środowiskowe elementów elektrycznych i elektronicznych, podzespołów maszyn i urządzeń, badania materiałów elektroizolacyjnych, badania trwałościowe, szoki termiczne (wodne) dla elementów elektronicznych i części montowanych w pojazdach (np. elektroniczne czujniki, wymienniki ciepła), badania szyb (rys. 20).

– **pomiary metrologiczne**

Laboratorium metrologiczne wykonuje precyzyjne stykowe i bezstykowe pomiary geometryczne (rys. 21), pomiar odchyłek kształtu i położenia metodami uniwersalnymi i metodami współrzędnościowymi oraz prezentację topografii powierzchni badanych detali.

– **dotatkowo Instytut oferuje prace i usługi w zakresie konstrukcji i produkcji**

Projektowane oraz wykonywane są specjalistyczne urządzenia kontrolno-pomiarowe, szablony, jak również wyposażenie technologiczne linii produkcyjnych. Od wielu lat pracownicy Instytutu rezydują w zakładach produkujących samochody, silniki oraz części, w imieniu producenta sprawując nadzór konstrukcyjny bieżącej produkcji. Klienci otrzymują również wsparcie oraz informacje w zakresie certyfikacji, homologacji, normalizacji, patentów (BOSMAL jest m.in. siedzibą Regionalnego Ośrodka Informacji Patentowej).

tion and position measurement with universal and reaction coordinate methods and presentation of surface topography of items being tested as well.

– additionally, the Institute offers studies and services in the range of construction and production

Specialist control and measurement devices are designed and made, along with templates, and technological equipment for production lines.

For many years the Institute's employees have been residents in car production plants and plants for engines and parts, on behalf of the producer having construction supervision of the current production.

Customers also get support and information in the scope of certification, homologation, normalization, patents (BOSMAL is (among others) the seat of the Regional Patent Information Center).

Confirmed competencies

The Institute's high competencies in the fields of a range of tests were confirmed with issuing of accreditation certificate for testing laboratory no AB 128 for conformity with the PN-EN ISO/IEC 17025:2005 norm. Regarding design, elementary and limited serial production of components for cars and their equipment with test stands and research-production devices a quality management system was implemented and certified – Certificate no JS-101/5/2010, for conformity with the PN-EN ISO 9001:2009 norm. The Institute pays particular attention to environmental protection. This fact is evidenced by the introduction and certification of an environmental management system according to PN-EN ISO 14001:2005. Out of concern for ensuring safe working conditions for employees, the Institute implemented and certified an occupational safety and health management system according to PN-N-18001:2004/OHSAS 18001:2007, obtaining certificate no B-21/1/2012.

BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd. is one of the largest research and development organizations in Poland. It has gained recognition among national, European and worldwide producers of cars together with producers of parts and car subassemblies. At present it is counted among the most significant research institutions in Europe and in the world. The circle of engineers and scientists constantly works on innovative projects, which are later implemented to be produced. BOSMAL is a company which determines the platform on which science and production meet, and knowledge, research and development directly influence the birth of new, modern products.

Antoni Świątek, DSc., DEng. – president and CEO, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr hab. inż. Antoni Świątek – prezes i dyrektor Instytutu Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: antoni.swiatek@bosmal.com.pl

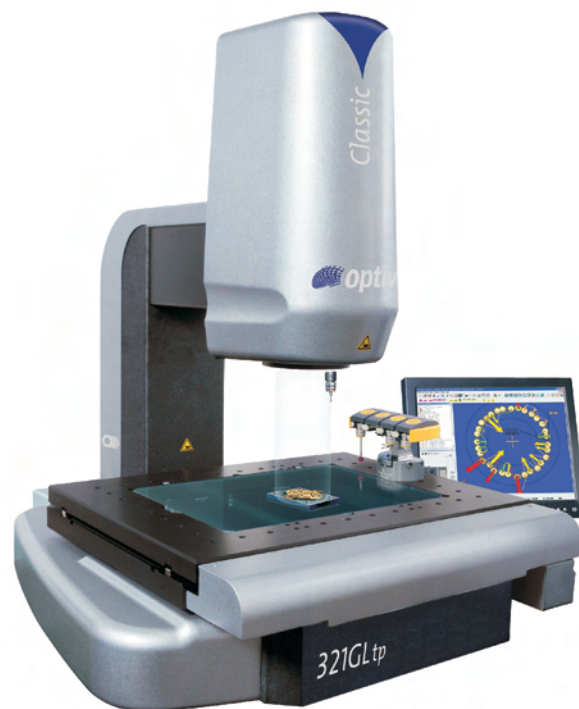


Fig. 21. Geometric measurement device

Rys. 21. Urządzenie do pomiarów geometrycznych

Potwierdzone kompetencje

Szerokie kompetencje Instytutu w dziedzinie badań potwierdzone zostały uzyskaniem certyfikatu akredytacji dla laboratorium badawczego nr AB 128 na zgodność z normą PN-EN ISO/IEC 17025:2005. W zakresie projektowania i produkcji jednostkowej i małoseryjnej elementów do samochodów i ich wyposażenia oraz stanowisk i oprzyrządowań badawczo-produkcyjnych wdrożono oraz certyfikowano system zarządzania jakością – certyfikat nr JS-101/5/2010 na zgodność z normą PN-EN ISO 9001:2009. Instytut szczególną wagę przywiązuje do ochrony środowiska. Świadczy o tym wprowadzenie i certyfikowanie systemu zarządzania środowiskowego wg PN-EN ISO 14001:2005. W trosce o zapewnienie bezpiecznych warunków pracy pracownikom, Instytut wdrożył i certyfikował system zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy wg PN-N-18001:2004/OHSAS 18001:2007 certyfikat nr B-21/1/2012.

Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL sp. z o.o. jest jedną z największych organizacji badawczo-rozwojowych w Polsce. Zdobył uznanie wśród krajowych, europejskich i światowych producentów samochodów oraz części i podzespołów samochodowych. Obecnie zaliczany jest do grona liczących się w Europie oraz na świecie instytucji badawczych. Grono inżynierów oraz naukowców nieustannie pracuje nad nowatorskimi projektami, które potem wdrażane są do produkcji. BOSMAL to firma, która stanowi platformę, na której stykają się nauka oraz produkcja, a wiedza, badania oraz rozwój bezpośrednio wpływają na powstanie nowoczesnego produktu.

Current and future trends in automotive emissions, fuels, lubricants and test methods – the view from the year 2012 *(perspectives from the 3rd International Exhaust Emissions Symposium, 24-25 May 2012, Bielsko-Biala, Poland)*

BOSMAL recently hosted the 3rd International Exhaust Emissions Symposium, entitled Current and future trends in automotive emissions, fuels, lubricants and test methods – 2012, which featured a total of twenty-five presentations from experts on automotive emissions and aftertreatment and the fuel and lubricant industries. The symposium's technical programme (presented on pages 113-114) consisted of one keynote address and five themed presentation sessions. The symposium formed part of a series of events to commemorate BOSMAL's 40th anniversary. The event built upon and the achievements of the previous two events and extended the format to cover new areas. Some of the most important trends mentioned during the symposium included: changes to test procedures to reflect the challenge of quantifying ever decreasing emission levels, accuracy and limits of detection and the role catalytic aftertreatment system and alternative fuel and oil concepts have to play in further reducing emissions from internal combustion engines.

Introduction

Concerns over the impact of the road transport sector on greenhouse gas (GHG) emissions and air quality remain high. Despite recent progress in fuel efficiency, road transport emissions are currently responsible for around twenty per cent of all greenhouse gas emissions in the European Union (EU).

Following the highly successful 1st and 2nd International Exhaust Emissions Symposia hosted in 2010 [1, 2] and 2011 [3, 4], BOSMAL Automotive Research and Development Institute Limited (of Bielsko-Biala, Poland) recently hosted the 3rd International Exhaust Emissions Symposium, held over 24-25 May 2012. Symposium delegates hailed from a total of fourteen countries on three continents, testifying to the international, multi-disciplinary, strongly collaborative nature of the event. The 3rd symposium featured one keynote address from a specially selected expert, as well as a total of twenty-four presentations from both industry and academia, covering a broad range of automotive emission-related subjects: emissions legislation, real-world emissions and fuel economy, compounds which are potential candidates for emissions regulation, emissions test equipment and its limits of detection, emissions reduction technology, aftertreatment system and catalyst technology, particulate matter (PM) and particle number (PN) emissions, fuel development, alternative fuels, gaseous fuels (CNG, LPG), and engine oil development.

Aims, context and format of the symposium

This third symposium was hosted as a direct result of the successes of the previous emissions symposia hosted by BOSMAL: the 1st and 2nd International Exhaust Emissions Symposia [1-4]. As before, the aim of the event was to provide attendees with an opportunity to both share and obtain information, knowledge and contacts in fields relating to automotive emissions, fuel and lubricants. In common with the previous two events, the symposium also featured an integrated social programme and provided excellent

opportunities for networking and informal discussions. A highly experienced individual with a background in both industry and academia was invited to deliver an extended presentation as a keynote lecturer. This keynote presentation commenced the first day of the symposium and set the tone for what was to follow. The remaining twenty-one oral presentations were divided into five themed sessions (see pages 113-114), each covering a particular aspect of automotive exhaust emissions: Emissions legislation and test method development, Powertrain Development/Test Method Development/Hybrids, Catalyst Technology & Emission Reduction Methods for CI&SI Engines, Particle Number & Particle Size Distribution Measurement Development and Fuel and Engine Oil Development. Each presentation presented during these sessions lasted around twenty five minutes, with five minutes allocated for discussion at the end. These opportunities to ask questions were well used by attendees and generated a number of interesting discussions on points raised during the presentations.

BOSMAL President Dr. Antoni Swiatek formally commenced the symposium by delivering an opening address (Fig. 1). After greeting the delegates and recognising that many had travelled great distances in order to attend, he mentioned how BOSMAL has been involved in automotive emissions testing activities (among others) for forty years. Dr. Swiatek also thanked the sponsors and media partners of the event. The rapid pace of change that currently exists within the industry requires ever more investment in equipment, test facilities and technical know-how. The first item of the technical programme was the keynote lecture (Fig. 2), followed by presentation session 1. Two further technical sessions were held that day. That evening, delegates were welcomed to a formal dinner event held in Kotulinski Palace in Czechowice-Dziedzice.

The following day featured the last two technical sessions. The second of these sessions was followed by a brief summary of the symposium, delivered by Professor Jerzy



Fig. 1. BOSMAL President Dr. Antoni Swiatek opening the 3rd International Exhaust Emissions Symposium



Fig. 2. Michael Walsh of the ICCT delivering his keynote address

1st day – Keynote lecture: Michael Walsh (The International Council on Clean Transportation) – Global trends in motor vehicle pollution control – a 2012 update

Growth in the vehicle population has been sustained and dramatic – there are now more vehicles on the roads than there were people on Earth two hundred years ago. This fleet of vehicles is a major source of urban/regional pollution and a global source of GHG. In response, for the last ten years, the International Council on Clean Transportation has monitored vehicular emissions and attempted to determine international best practice, with a focus on the ten largest global markets. There is a growing focus on $PM_{2.5}$ as a public health concern, largely due to its strong association with mortality; there may be no threshold (meaning any exposure at all is detrimental). There are no large urban conurbations on Earth where $PM_{2.5}$ levels are not high. Vehicles consistently contribute 20-35% of direct $PM_{2.5}$ emissions; the close link between health problems (asthma, etc) and proximity to vehicles may be mainly due to $PM_{2.5}$, rather than gaseous exhaust emissions. Depending on urban architecture, up to approximately half of a city's inhabitants may live close to (within 500 m of) a major road. A recently-introduced $PM_{2.5}$ standard introduced in China was found to be exceeded in every large city. City-wide emissions limits may not help much – heavy trucks from other areas “import” low quality fuel and engines meeting older emissions standards into the city, thereby affecting urban air quality. Additionally, efforts to improve air quality are being hampered by low quality fuel in certain markets. China would have made more progress if fuel quality had not caused so many problems. Similar issues have surfaced in Brazil, Mexico, India and Russia. The cost of improving fuel quality depends both on the fuel

type (petrol/Diesel) and on the market in question, but an assessment conducted by the ICCT suggested that costs per litre of fuel produced are generally modest, notwithstanding the common perception that improving fuel quality is extremely expensive.

California was the first jurisdiction to set automotive emissions limits and to this day automotive technological developments often flow from California to the rest of the USA, from there to the EU and then to the rest of the world. The latest trends in California are therefore of great interest. These include very stringent NMOG, NO_x and PM emissions limits and a durability requirement of 150 000 miles (241 000 km; around 15 years' usage). California remains without a particle number limit for any engine type. There has been much debate on an emissions limit, but it was decided that a mass-based limit would accomplish the same goal. (Doubts were also expressed over the test methodology for low levels of PN emission.) Regarding fuel economy, it is

Merkisz (BOSMAL/Poznan University of Technology) that formed the closing ceremony of the conference proceedings. Additionally, attendees were offered guided tours of BOSMAL's various departments and testing facilities and time was available for further networking, bilateral meetings and discussions on current and future projects.

A further three presentations formed part of the Symposium Proceedings, but were not presented orally, due to time constraints. Each of these presentations was accompanied by a poster. These three posters were on display during the various coffee breaks. These presentations and their accompanying posters were authored by BOSMAL employees and represented BOSMAL's latest research efforts on automotive emissions themes.

Presentation abstracts and selected key slides

NB: the authors listed here are presenting authors only (i.e. one author per presentation). See symposium's programme (pages 113-114) for the full listings of all co-authors of each presentation.

difficult to compare the US and the EU (due to the percentage of SUVs in the fleet, average vehicle weight, percentage of Diesel vehicles in the fleet, average engine displacement). California hopes and expects that by 2025 around 15% of vehicles sold will be powered by fuel cells and is taking steps to ensure the availability of hydrogen, as the density of current infrastructure is insufficient. California and the EU differ on their visions for usage of CNG and LPG; California expects these vehicle fleets to remain small and thinks that natural gas is better put to use generating electricity. California has a target of reducing GHG emissions (relative to 2000 levels) by 80% by 2050, with ICE-powered vehicles predicted to continue to dominate until at least 2025-2030. The additional cost to the consumer for a typical passenger car will be around \$2 000, equivalent to a payback period of 3 years (although this period could be considerably shorter with higher fuel prices). However, there remains no guarantee that people will buy these vehicles. However, it should be noted that California is not typical regarding fuel-cell vehicles and the state lies well ahead of the curve; the rest of the world is at least 10 years behind California on this issue. Life-cycle emissions vary by market: energy used in the production of vehicles in California is cleaner than in other markets, and figures calculated for California may not apply elsewhere.

Globally, road vehicles dominate fuel consumed for transport (and therefore GHG emissions). While other sectors are important, LDV are the main target for improving efficiency. In this area, the EU is the leader. Roughly 3 out of every 4 cars produced in 2012 will be subject to fuel efficiency requirements, and this proportion will rise to 4 of every 5 cars before long (Fig. 3). Currently, the emission of 1.6 Gt of CO₂ has been avoided via LDV efficiency standards; this value could become much larger, depending on future legislative moves. It would appear that the EU's 2020 target of 95 gCO₂/km can be met at a cost of around

€900/vehicle. However, short-lived climate forcings are now coming under considerable scrutiny. Reducing emissions and GHG would have wide-ranging positive impacts, ranging from improved respiratory health to reduced crop damage (for example). As always, in-use emissions performance is what really counts. There is a large discrepancy between type approval fuel consumption/CO₂ emissions and real-world values (see, for example [5]), a topic involving both legal and technical issues, and this is a discrepancy that needs to be addressed, for example through the implementation of more realistic test cycles (e.g. the WLTC), randomized cycles and on-road testing, or indeed a combination of all three approaches.

Session 1 – Emissions legislation and test method development

Chairs: Michael Walsh (USA) and Dr. Piotr Bielaczyc (Poland)

Dr. Piotr Bielaczyc (BOSMAL, Poland) – Emissions legislation/test method development over the last 40 years and predictions for the next 40 years

Emissions have a long history, but emissions regulation is much younger. The industrial revolution changed the game regarding emissions and humankind started to have an impact on the composition of the atmosphere. California experienced the effects of vehicular emissions and so set emissions standards to limit them. The balance of global energy supply and demand is evolving, but coal retains a huge share, particularly in developing countries. Since the 1960s, various legal jurisdictions have set emissions limits for light-duty vehicles, which have been reduced massively over time (Fig. 4). In EU emissions legislation, the main recent change has been regarding the introduction of PN testing and limits. While US and EU legislation has generally moved in the same direction (lower limits, wider range of regulated components, cold start test requirements, etc), the US and

EU markets and emissions landscapes remain difficult to compare. In the past, both emissions and fuel consumption were poor. Both parameters must be improved simultaneously and “diagonal” progress must be made, rather than only making progress regarding one parameter (Fig. 4). Engine downsizing is a key weapon in the fight to reduce fuel consumption, but must be done in the right way. Also, reducing vehicle weight improves fuel consumption, emissions and performance. A growing focus on real-world emissions and fuel consumption leads to interest in emissions at low and sub-zero ambient temperatures. Fuel consumption at -7 °C has improved, probably mainly due to changes to the engine calibration. In the future, a greater number of exhaust gas components may be regulated (particle surface area, PN from DISI/PFI, NH₃, NO₂, N₂O, GPF regeneration, SCR performance) and greater emphasis will be placed on obtaining results that are representative and realistic. Political (rather

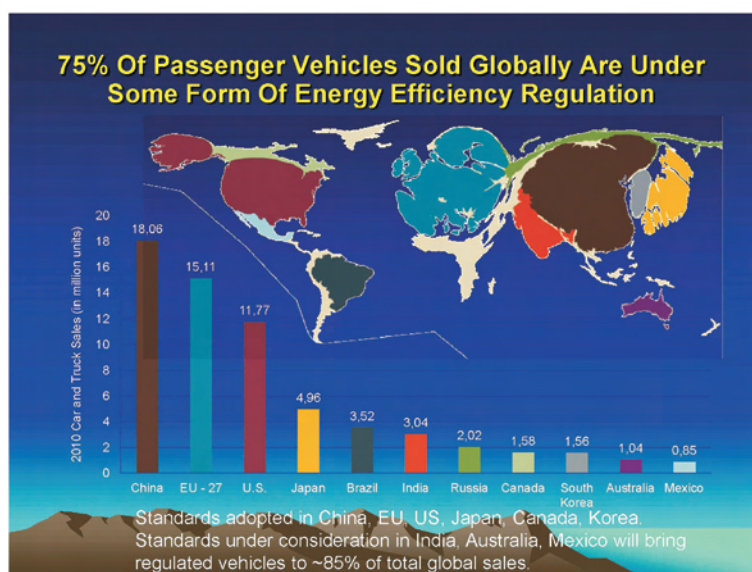


Fig. 3. The relative sizes of various global automotive markets, some of which regulate energy efficiency

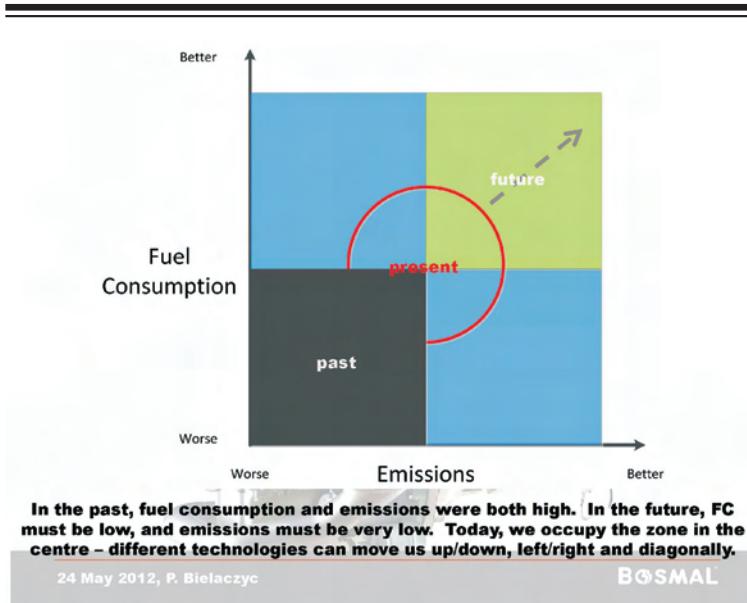


Fig. 4. Light-duty vehicle development megatrends presented as perpendicular goals

than technical) legislation relating to transport, sources of energy, etc. will have the greatest impact on the personal transportation sector. The demand for R&D work to meet these requirements has never been greater. BOSMAL has 40 years' experience working with engines, vehicles and emissions, and recent investments mean it is well placed to provide for the needs of the future, ready to play a role in the development on cleaner solutions for personal mobility.

Les Hill (Horiba Europe, UK) – Recent development and trends in exhaust emissions control

the present situation is an exciting time regarding automotive emissions legislation – as substantial changes are being made to emissions limits, emissions test procedures, equipment, etc. Changes are underway to make emission testing conditions more realistic. Add to this mix pressure to use alternative fuels and biofuels, all the while ensuring full compatibility and drivability. This combination of changes and additional requirements conspire to produce what could be described as “the perfect storm” for vehicle and engine manufacturers. Regarding the upcoming European emissions standards (Euro 6), the main issues are: particle number emissions from direction injection petrol engines and NO_x emissions from Diesel engines. An overriding trend in Europe is that of gradual changes to engines and powertrains, with multiple goals, including the capability to use multiple fuels. In the EU, concern over emissions centres around NO_x and PM. The emissions limits for these pollutants are now very low, but air quality problems remain. The proportion of NO_x which occurs as NO_2 is also a cause for concern (this proportion is much higher for Diesel vehicles, related aftertreatment systems). In the USA, California's legislation will eventually intermesh with Federal US legislation, homogenizing the emissions landscape in that country. Current US

limits are stringent, particularly for PM. The current limit of 3 mg/mile (to be replaced by a limit of 1 mg/mile) are problematic – there is considerable doubt over the accuracy of measurement of such low emission levels. Questions have been raised over whether emission from the vehicle is really being measured, or whether other factors, such as cleanliness of the dilution air, weighing balance drift, etc are the factors which really control the result. The forthcoming 1066 procedure for testing light-duty vehicles is still being drafted, but the procedure for PM measurement should be in place by 2017, with other components following in 2022. The method used to provide fuel consumption data to consumers in the US has changed, with a composite result from five test cycles now used to determine “real-life” fuel consumption for the US market. The forthcoming EU CO_2 emissions limits would be extremely punishing to large-volume manufacturers who exceed the limit – a cost of around €100 million per gram of CO_2 might be incurred. Such high financial stakes mean manufacturers will insist on very reliable, highly repeatable emissions measurements. There has been much debate over how to test HD vehicles: testing on a chassis dynamometer creates practical problems; testing on-road would have to be defined ab initio; the remaining possibility – namely simulation and modelling – is not acceptable to the EPA. For light-duty vehicles, potential issues have come to light regarding testing of cars with hybrid powertrains. (If the IC engine starts for the first time during the last 10 s of the cycle, the quantity of gas collected is insufficient to provide an accurate measurement.) Interest is growing in measuring emissions of a range of “additional” compounds (Fig. 5). Recent tests have confirmed that manufacturers' CO_2 emission values are almost impossible to replicate – repeat measurements always return higher results. The development

Compounds To Be Measured (Currently)

■ For USA / CARB

- THC, NMHC (via CH_4), NMOG (via NMHC, Ethanol and Carbonyls), CO, NO_x , PM mass
- CO_2 , CH_4 , N_2O for Greenhouse Gas measurement
- Ethanol and 13 aldehydes / ketones
 - For 1066
 - for ethanol content > 25% then measure ethanol and carbonyls
 - for ethanol content \leq 25% then measure or use formula from NMHC emission
- Solid particle number may be applicable for low PM mass equivalent

■ For WLTP

- THC, NMHC (via CH_4), NMOG (via NMHC, Ethanol and Carbonyls), CO, NO_x , PM mass, Solid Particle Number, NO_2 (as mass limit or % of NO_x mass ?)
- CO_2 , CH_4 , N_2O for Greenhouse Gas measurement
- Ethanol, Acetaldehyde, Formaldehyde
 - for ethanol content > 20 % then measure the above compounds
 - Factor to convert NMHC to NMOG under discussion

Explore the future

© 2012 HORIBA, Ltd. All rights reserved.

HORIBA

Fig. 5. “Traditional” and “additional” pollutant species measured currently (EPA/ CARB) and in the near future (WLTP)

of a harmonized global light-duty vehicle emissions test procedure (the WLTP) is a significant development. The idea is to have a universal test procedure and drive cycle, but with local emissions limits. The aim is to produce a drive cycle that is representative of real conditions on the road, including periods of severe acceleration, microaccelerations and a higher top speed than current legislative cycles. Testing will also be performed with onboard accessories (A/C, electronic navigation aids, etc) both on and off. Additionally, in order to measure real emissions performance, testing will be required on-road (using PEMS) or in the laboratory, but using randomized cycles (details of which are not known to the manufacturer before the test). It is even possible that both approaches could be used; a decision on this is due in the near future.

Wolfgang Thiel (Technical University Munich, Germany) – Measuring near-zero automotive emissions – a big challenge

Unfortunately, Mr. Thiel was unable to deliver this presentation in person, so it was delivered by Les Hill of Horiba Europe. While zero emissions from vehicles would be very welcome for a variety of reasons, it is impossible and impractical to measure zero emissions. “Zero” as a concept represents a very small number, but also a very precise number. Depending on the context, some emissions can be so low that they are indistinguishable from zero; as the emission factor approaches zero, the worse such problems become. As the sample and the ambient sample concentrations approach numerical equivalence, the accuracy of the measurement begins to be determined entirely by the accuracy of the dilution factor, which is itself at the mercy of a number of other parameters. For low emission levels, a huge range of interfering factors become significant; practically everything can change the results, but a few factors are particularly important. The presence of very low levels of contaminants in span gases can create errors in the calibration process, leading to an offset in the concentration value returned by the analyser (the current specified purity tolerances for span gases are relatively lax). Pollutant compounds can change the viscosity of the sample gas and cause phantom readings (flame ionization detectors can even show a response to water molecules). Quantification of hydrocarbons as very low levels is difficult, and many corrections have to be made; even the geometry of the flame itself has to be considered. Similarly, there is some evidence that CO₂ analyzers may show a phantom response to water in the sample gas. Even where a zero-carbon fuel is used (i.e. H₂), CO₂ emissions of around 1.5 g/mile (0.93 g/km) will be recorded, simply from the flow of air ambient air through the powertrain. The hydrogen content of the fuel can affect the CVS, and thereby skew all emissions results. For low PM and PN measurements, background levels become significant. Some PM filters trap certain gases (including hydrocarbons) to produce artefacts and produce an apparent mass increase, to such an

Measuring Near Zero Automotive Exhaust Emissions A Big Challenge PM.

Safety Margins between Development and Type Approval Limit

The LoQ signals the start of the green curve of manufacturing possibilities, also known as the safety margin.

The curve's position, peaking with a development target of 3.8 mg/mi, which is well below the official type-approval limit value, takes various factors into account:

- 1) the reproducibility of measurement results from lab to lab, 2) the COP (the compliance of the series production vehicles) and 3) development factors that may be economic, logistic or technical.

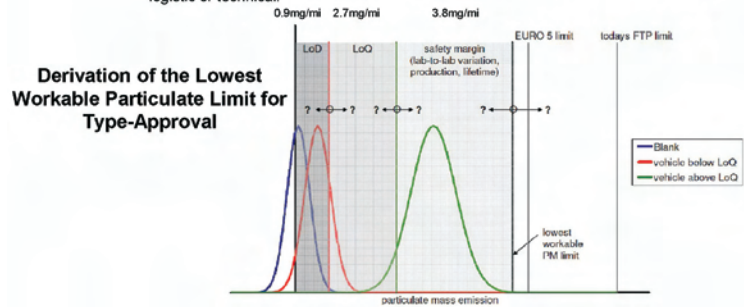


Fig. 6. Quantitative considerations of the lower limit of accuracy regarding gravimetric PM measurements

extent that emissions limits can even sometimes be exceeded without the engine running at all. The result of this interference is that using the current method, the lowest viable limit has been calculated to be 7.3 mg/mile (4.54 g/km); current legislative limits are very close to the limits of accuracy and reproducibility (Fig. 6). The topic of PN measurement has not yet been concluded; current testing requirements will inform the final decision on a robust methodology. For measurement of all pollutant types, technical progress has meant that emissions limits approach the limits of detection – thereby creating a need to know which emissions values which are statistically equivalent to zero.

Dr. Christos Dardiotis (European Commission Joint Research Centre, Italy) – JRC's contribution to the revision of the european type approval procedure for light duty vehicles

European Union legislation specifies a number of different tests relating to emissions from passenger cars. Revisions to multiple test types are currently being planned. These revisions are deemed necessary due to a range of factors, from increased use of biofuels to political targets for reduced CO₂ emissions. The test procedure for evaporative emissions (the Type IV test) will have to be modified, due to wider use of biofuels (namely ethanol). Durability is also a potential issue in this area and the three new test scenarios currently under consideration attempt to address this. In future, a mixture of type-approval and self-certification could be used. The canisters themselves will also have to change – to become somewhat larger, more resistant to ethanol, etc. The main change to the emissions testing procedure (the Type I test) will be the driving cycle, but supplemental requirements for real driving emissions will also be introduced. PEMS monitoring has revealed that emissions of virtually every automotive pollutant are exceeded during real-world usage of vehicles which meet the limits under laboratory conditions. One option is to perform on-road testing using PEMS

to ensure compliance, or mandate laboratory testing using randomized cycles. Both options are under consideration and in fact future legislation may require both types of testing to be carried out. The low temperature cold start test, in which the first phase of the legislative test cycle is performed at an ambient temperature of -7 °C (the Type VI test) may have its limits reviewed. The current limits were carried over from Euro 3 legislation at the time of the introduction of the Type VI test and these limits for emission of HC and CO need updating, as passenger cars meeting the Euro 5

for legal, technical and commercial reasons and so there is a requirement for the execution of substantial numbers of tests. In general, this testing should be realistic (but the NEDC is normally used; depending on the test setup, simulation of turns, etc can also be possible). Conceptually, the test procedure is the same as for vehicles featuring conventional drivetrains. One major deviation is the concept of the total energy balance at the end of the test cycle – generally the calibration is such that over the NEDC, the battery's state of charge returns to its original value. When the vehicle makes

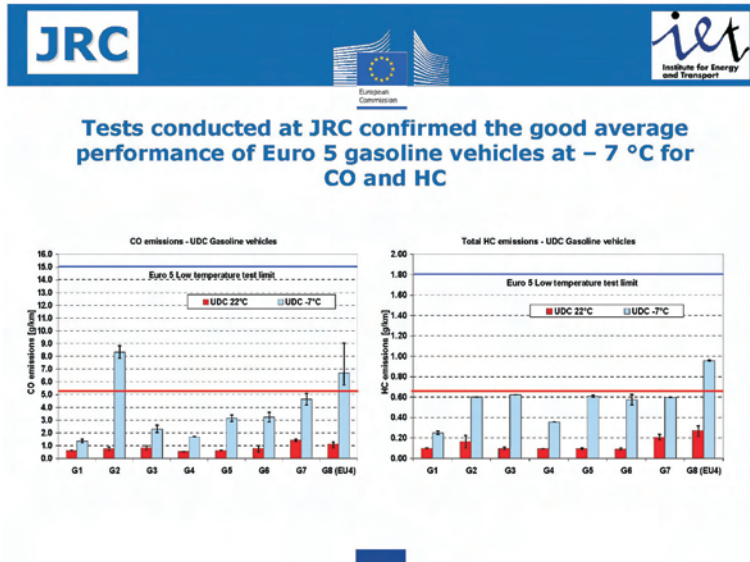


Fig. 7. CO and HC emissions results obtained at -7 °C, presented in comparison to the legislative limit

and 6 standards easily meet the Type VI test HC and CO limits (by a very large margin in most cases – see Fig. 7). Regarding diesel operation at -7 °C, emissions of NO_x are of greatest concern. For SCR-equipped vehicles, emission of NO_x is generally only an issue during the UDC, after this the system has reached its operating temperature and deals with NO_x in the exhaust gas effectively. The possibility of extending the Type VI test to include NO_x emissions from all light-duty vehicles with CI engines is currently under consideration.

Kurt Engeljehring (AVL, Austria) – Hybrid vehicles – emission test and measurement challenges

Growth, both in the general population and in the number of vehicles in use, means we have no option other than to become more efficient. Hybrids were developed as an attempt to increase efficiency and make better use of limited natural resources (i.e. fossil fuels, clean air). A conventional vehicular powertrain does not reclaim any mechanical energy, and so no recovery of energy is possible. The potential benefits that hybrid powertrains can provide need to be quantified

only limited use of the IC engine, emissions of HC, CO and NO_x can be as much as 84-90% lower than the relevant Euro 6 emissions limits. After the initial start up, hybrid systems improve the emissions performance during subsequent starts of the engine – in fact such a system shows advantages over a Stop&Start system (no CO or HC peaks, apart from the initial start-up when the engine and its fluids are at the ambient temperature – see Fig. 8). Off vehicle charging complicates matters – cycles have to be run while monitoring the state of charge. Some vehicles can even run the whole NEDC without resorting to the ICE at all. Running “best case” and “worst case” tests provide data for a weighted calculation. The availability of off-vehicle charging and the frequency with which it is performed affect the real-world emissions performance of a vehicle. It is assumed that the vehicle can be charged every 25 km. Running the majority of the test without the ICE running results in over-dilution of the (limited) exhaust gas that has been generated. One possibility would be to turn off bag sampling for periods where the IC engine is shut off, but this is currently prohibited in all relevant legislation and the sampling volume must also be great enough to permit analysis. For R&D testing, sampling of the raw exhaust (Fig. 8) avoids these problems, but for legisla-

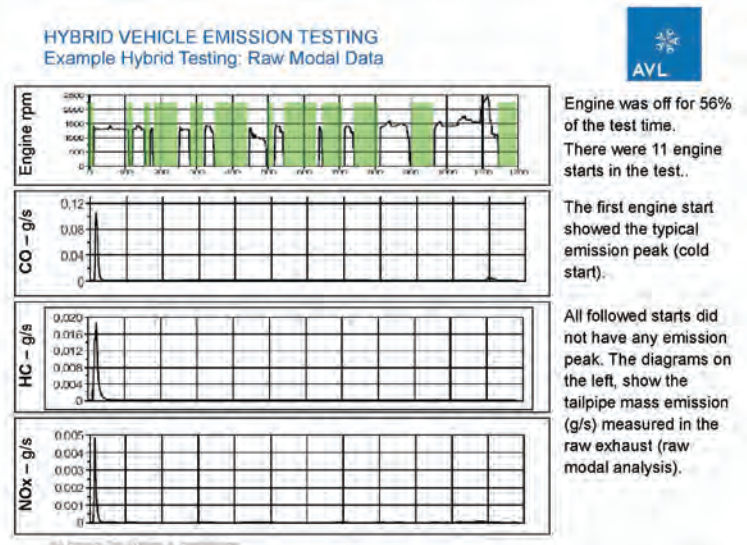


Fig. 8. Raw (undiluted) CO, HC and NO_x emissions from a hybrid vehicle, showing peaks only for the initial cold start

tive testing, it is clear that the 40-year-old test procedure is inappropriate. The test stand's constant volume sampler can pull air through the powertrain, cooling components including the catalytic aftertreatment system, changing emissions results and filling the TWC with NO_x . (A potential solution to this problem would be a temperature-controlled valve which prevents the CVS from sucking air through the powertrain when the engine is not running. However, such a solution has yet to be agreed upon, still less approved in automotive emissions legislation.) Technology moves much too fast for legislation to follow. To avoid protracted discussions and road-blocks in the future, it is important to agree on a robust procedure now. The drive cycle used for testing is perhaps more important for CO_2 than emissions and this aspect is particularly important for testing of hybrids. The current driving cycles are all extremely well known and even cycles slated to be introduced in the future are widely available online. To ensure that exhaust emission limits for all vehicle types (including hybrids) translate into concrete air quality benefits, off-cycle emissions must be addressed.

Session 2 – Powertrain Development/Test Method Development/Hybrids

Chair: Professor Giovanni Cipolla (Italy)

Professor Giovanni Cipolla (Politecnico di Torino, Italy) – Euro 7 emissions challenge for IC engine

In the past, emissions limits were set and the positive impact of these measures on ambient air was assumed by default. The automotive industry finds itself a major target in a wide-ranging drive to improve sustainability, reduce pollution and improve ambient air quality. Regarding the well-known and widely reported differences between type approval values and on-road values, the user (driver) has no way of telling what real world regulated emissions are, but can tell very easily what the real-world fuel consumption is. Under certain conditions, a trade-off is observed between regulated emissions and fuel consumption – and it should be kept in mind that one is of far greater concern to the user than the other. Despite the difficult current climate and legislative and technical pressure, the internal combustion engine is far from dead – and there remains much work to do on it. Further development and refinement of ICEs is the first step in a long-term programme to improving the environmental performance of vehicular powertrain solutions (the next step is more widespread adoption of alternative fuels). The next round of emissions legislation (the Euro 7 standard) has not been confirmed and any comments on this subject are mere speculation. However, it has been clear for some time that the test procedure (particularly the driving cycle) may well change. Changing the driving cycle changes the engine operating parameters (Fig. 9), with multiple impacts on the calibration, ATS, etc. It will almost certainly become harder for manufacturers to engage in “cycle beating”. However,

current technology will probably be sufficient to meet the next round of emission limits, but will require adaptations and improvements in certain cases. Completely new technologies will likely not be required. Rather than putting all the emphasis on ATS, we can reduce the engine out emissions, but ATS will always be required for ICE. ATS can help us to overcome the trade-off between fuel consumption and emissions. Longer driving cycles will make things easier for manufacturers (cold start a smaller proportion of the total cycle). Downsizing and downspeeding are also in this area, but have opposing effects on HC and NO_x emissions. Driving cycle construction is highly complex – whatever is chosen, it will be unrepresentative of driving conditions in many areas. For ultra-realistic considerations of fuel consumption, turning, bumps in the road, chassis/suspension resonance and abrupt swerving will all have an impact. The current situation, where requirements to reduce emissions and GHG emissions are the main drivers of development of vehicles, engines, ATS, etc looks set to remain unchanged for the foreseeable future.

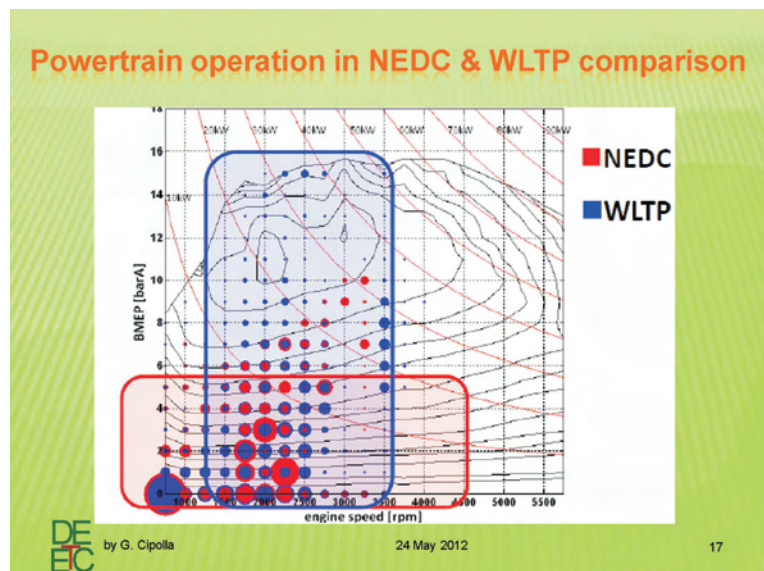


Fig. 9. Typical engine operating parameters over the NEDC and the proposed WLTP cycle

Ignazio Gentile (Fiat Powertrain, Italy) – Cylinder head integrated manifold on gasoline turbo engines

across Europe (and elsewhere) a feature of urban living is the presence of heavy traffic. This has a large impact on urban air quality. Fiat recognises that “the next big thing” is for green vehicles. In response to this, Fiat developed the TwinAir engine family, which remains the most recent addition to Fiat’s engine options. The engine comes in several versions, both turbocharged and naturally-aspirated, for two different fuel types (petrol and CNG). The design criterion was to simultaneously increase driving fun and reduce fuel consumption. Since the benefit derived from modifying existing technologies follows an asymptotic curve (i.e. increasing effort in needed to deliver smaller and smaller returns), a simple yet new idea can make a large difference for relatively

little cost/effort. With this fact firmly in mind, the cylinder head and intake manifold were designed especially for this application. Additionally, for turbocharged versions, a new turbocharger configuration was devised. It was not possible to implement such innovations on an existing engine, and so the new engine was designed from the ground up. Thermal management in the engine system avoids excessive catalyst

Eike Martini (AVL, Austria) – Emission calibration yesterday, today and tomorrow

in the past, emissions control was all done via hardware, with no computer control and limited possibilities for re-calibration. Emissions standards were lax and could be met in other ways. Any re-calibration had to be performed by taking the car off the road and altering settings – there was simply no possibility of updating/changing calibration settings on the fly. There was no on-board diagnosis system. This situation has changed dramatically, such that currently full on-line access to many parameters is possible, effectively giving a vehicle more than one calibration. Today’s OBD systems have access to more than 50% of all functions. Currently, the road environment is the most important for calibration – and simulation environments the least important, but this will change somewhat in the future. Long term goals include eliminating transient peaks and improving real world fuel consumption, with an increasing emphasis on transient operation and the resulting emissions (Fig. 11). Interactions between systems which are separate must be considered, as the emissions, fuel consumption and drivability result from the combined efforts of these individual systems. Multiparameter trade-offs regarding emissions, fuel consumption, performance, etc need to be analysed and compromises found. This can be done by humans, but is much more rapidly and efficiently achieved

by computers. Data handling can occupy up to 51% of the time of employees involved in tasks such as refining and optimising calibrations. Different file formats, data array sizes, etc can cause problems and waste time. While there are robust procedures and control protocols for changing any mechanical component in a vehicle, calibration parameters

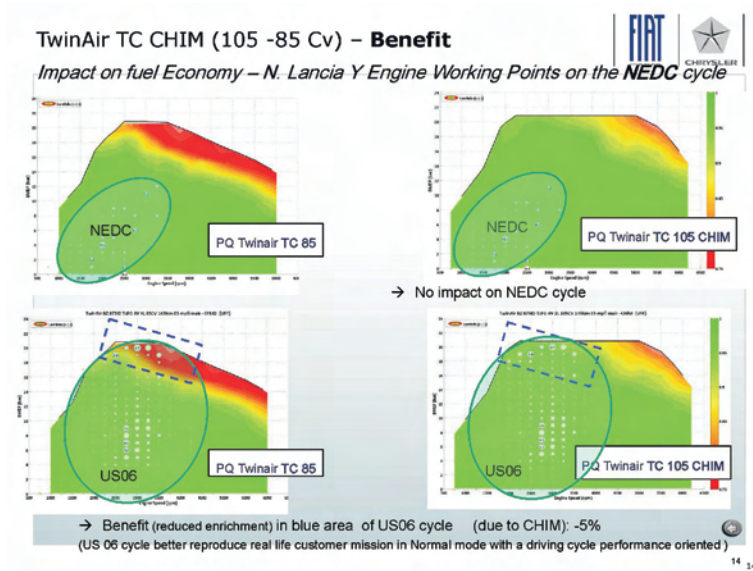


Fig. 10. Fuel enrichment maps for non-CHIM (left) and CHIM (right) Fiat Twinair engines over the NEDC and US06 cycles

temperatures, while allowing very high in-cylinder temperatures. Such a strategy permits excellent oxidation of the fuel, while avoiding long-term damage to the ATS. Benchmarking with an engine produced by a well-known competitor yielded favourable results. One of the main standout features of the new engine type is the integration of the manifold into the cylinder head (cylinder head integrated manifold, “CHIM”). The main benefit of this innovative strategy is reduced fuel consumption. Over the NEDC, no real reduction in fuel consumption is visible, but for “real world” driving behaviours (and over more aggressive drive cycles, such as the US06), enrichment can be avoided at high injection pressures (Fig. 10), thereby reducing fuel consumption. Great attention is paid to the casting process, in order to produce a high-quality surface finish suitable for use in high-pressure environments. Following casting using the lost foam method, hot isostatic pressing is employed to produce a surface suitable for use in high-pressure environments. The HIP process results in the elimination of pores and the creation of a higher-quality surface finish. The integrated manifold is an excellent example of how simple ideas and modest refinements can help in the continuing drive to reduce emissions and fuel consumption of modern IC engines.

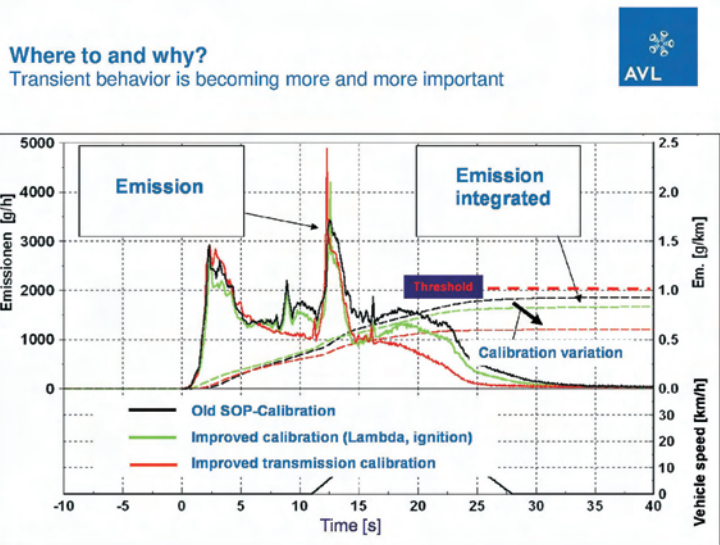


Fig. 11. The impact of calibration refinements on emissions behaviour during transient powertrain operation

are often changed ad-hoc, with little record kept of the evolution of the calibration through time. This is an anachronism which needs to be urgently addressed. In certain situations, the calibration can be the weakest link in the chain, thereby frustrating efforts regarding the system as a whole (i.e. the vehicle). In order to assess the suitability and viability of a particular calibration, integrated testing must be performed – involving measurement of emissions, fuel consumption and driveability under variable conditions. Trends for the future include increased use of in-vehicle measuring equipment and an even greater level of automation and computerization for the entire calibration process.

David Mauke (EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Switzerland) – CNG and CNG hybrid vehicles: a potential concept to reduce CO₂ emissions?

Carbon dioxide emissions limits set to be introduced in the EU in the near future will implement an ambitious trendline for the correlation between vehicle weight and CO₂ emissions (Fig. 12). When subjected to such an analysis, CNG-powered vehicles perform well. The operating parameters (i.e. typical drive cycle) are crucial for determination of the relative performance of vehicles with different engine/fuel types. A series of tests revealed a CNG-powered vehicle to outperform hybrid, petrol and Diesel powertrain concepts under rural and motorway conditions (in terms of CO₂ emissions); under urban conditions the CNG concept came second only to the hybrid vehicle. When subjected to well-to-wheel life-cycle GHG analyses, CH₄ seems like a very attractive fuel. However, as a great deal of driving (particularly urban driving) involves regular braking, coupling hybrid systems with CNG powertrains can improve the GHG performance still further – using a clean, low C fuel, and recovering energy via an electrical generator. The various options regarding fuel types fit differently to different applications. A diversification approach is

required, whereby fuel consumption is reducing where it can be reduced and drivetrains and fuels are replaced where appropriate. CNG is chemically different from petrol and CNG applications require specialised ATS, as methane oxidation is difficult to achieve. The high octane number of methane would permit much higher engine compression ratios, thereby increasing thermal efficiency. The flame temperature is lower, leading to lower NO_x emissions, if the system is generally well-designed. Manifold and direct injection CNG delivery strategies have been assessed; both are functional, but research continues into the impact on emissions and fuel consumption. CH₄ and H₂ could be good options for storing energy from solar/wind, i.e. when conditions are favourable (sunny/windy), the energy is used to make fuel, and fuel production is halted when conditions become unfavourable. Usage of mixtures of CH₄ and H₂ is also possible, with substantial CO₂ emissions reductions observed at lighter loads. Many ultra-clean vehicles are presented at trade shows, described in journals, etc, but very few ever complete the journey to vehicle showrooms. CNG vehicles could be the first to start to seriously break this trend. CNG tanks and hybrid systems (with their batteries) add weight and to the vehicle and require space onboard, but experimental data suggests that the FC benefits they provide outcompensate these effects, particularly as hybrid systems permit the use of smaller, lighter fuel tanks.

Session 3 – Catalyst Technology & Emission Reduction Methods for CI&SI Engines

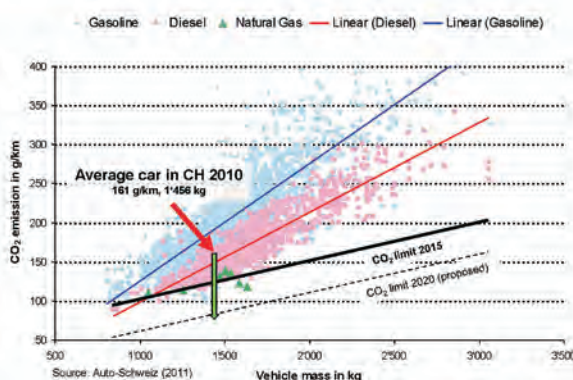
Chair: Dr. Andre R.R. Silva (Portugal)

Dr. Gerardo Carelli (Umicore, Italy/Germany) – Efficient NO_x aftertreatment technologies for clean diesel

pessimism regarding a “perfect storm”-type situation for the automotive industry (as described above, in Session 1) may in fact be overstated. In the past, there was much pessimism within the industry surrounding the introduction of PM/PN limits and the total demise of the Diesel engine was even forecast. Quite evidently, this never occurred. Current emissions standards for Diesel engines are stringent and demanding, but can be met with the use of various aftertreatment technologies acting in concert. One of the overwhelming difficulties regarding meeting European Diesel emissions limits is the low engine out temperatures encountered during the UDC. There are three configurations options for Diesel aftertreatment systems to meet stringent emissions limits: DOC+cDPF, NSC+cDPF, DOC+cDPF+SCR – this last one allows maximum elimination of NO_x, but is the most costly option. NSC was originally devised for medium- and heavy-duty applications, but changes and refinements now mean it can be applied to passenger cars. For CI engines, NO_x is the pollutant of greatest concern. NO_x itself is regulated via emissions standards, NO₂ is regulated in air quality standards, regional limits and

CO₂ emissions of passenger cars

From 170 g/km ⇔ 130 g/km (2015) ⇔ 95 g/km (2020)



6 David Mauke - 3rd International Exhaust Emissions Symposium 24-25 May 2012



Fig. 12. CO₂ emissions as a function of vehicle mass for natural gas powered vehicles alongside other vehicle types

emissions standards. NO_2 is as big an engineering problem as NO_x . A NO_x storage catalyst (NSC) is like a sponge – it fills up and requires regeneration before too long. Sulphur competes for active sites on the catalyst, so the effectiveness of the system depends somewhat on fuel sulphur content. (A target for the future is the development of systems which exhibit a greater tolerance to sulphur.) New technology can drastically improve the performance of NO_x conversion at lower temperatures, as well as the sulphur tolerance and HC and CO conversion light-off points. Technological improvements such as these can make systems more practical and ease implementation. Urban driving conditions present difficult conditions for performing any kind of regeneration.

right systems for a given application and put them in combination. No application currently requires all available solutions. The SCR system seems promising, and has been the subject of much research. The ‘fast SCR’ reaction is the target. Changes to the substrate enable reasonable control of ammonia slip. Even at high space velocities, through the entire range of normal engine operation, NO_x conversion performance of an Ecocat system was shown to be good. Achievement of acceptable conversion at low temperatures is a development target. Limiting the ammonia slip to 10 ppm by reducing α had a limited effect on the NO_x conversion efficiency. The effectiveness of SCR systems for Diesel applications depends strongly on the cell density. A Vanadium-SCR (V-SCR) system was approved by the EPA and CARB for off-road applications (the first such approval of this type), with the durability judged to be good enough to obtain the aforementioned approval. Regarding the control of ammonia slip, a good development strategy is to set an ammonia slip limit and explore options which meet this limit. By using an ammonia slip catalyst, higher dosing can be used, thereby keeping performance high. During a DPF regeneration, the temperature of the exhaust gas is much higher, and so V-SCR systems must exhibit high thermal durability. (In fact, they must be able not only to withstand high temperatures; they also need to function well at high temperatures.) A special thermally stable solution showed much better behaviour than less advanced designs, especially following long-term ageing. The SCR system necessitates complicated electronics; the system requires its own controller and many connections. A relatively large amount of information must be exchanged between components and systems (Fig. 14). Somewhat surprisingly,

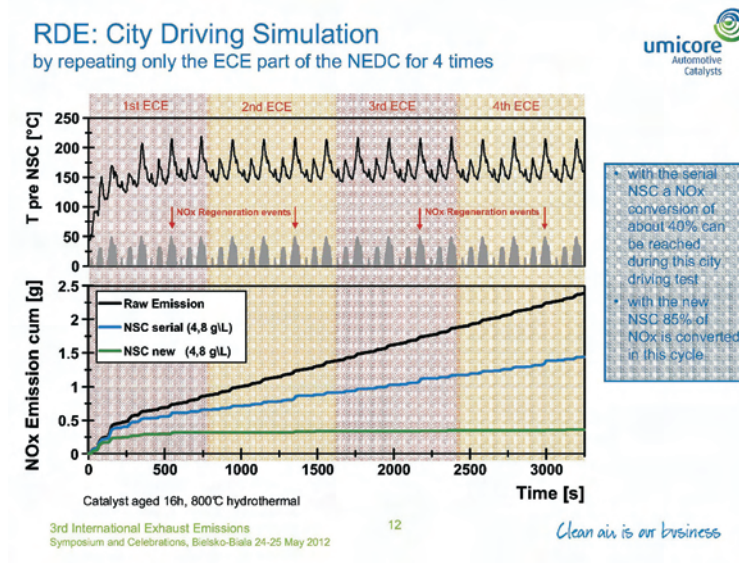


Fig. 13. NO_x emission from two NSC systems under simulated urban driving conditions

Since 75% of NO_2 is emitted in urban environments, NSC+cDPF systems are of interest and will be the main weapon with which to fight NO_2 in urban areas. Tests of a new type of system under urban driving conditions revealed substantial reductions in NO_x emissions, without any increase in the PGM loading (Fig. 13). With this new technology, where use of a DOC is avoided, excellent fuel economy can be achieved. Testing revealed the durability characteristics to be good and the deterioration to be limited. Various combinations were tried regarding metals, coating types and coating processes. This solution was designed for conventional Diesel engine types, but could perhaps be gainfully employed for alternative combustion strategies.

Dr. Toni Kinnunen (Ecocat Finland) – Emission techniques and related SCR systems by Ecocat and Albonair

There are many options available for Diesel applications – the best strategy is to chose the

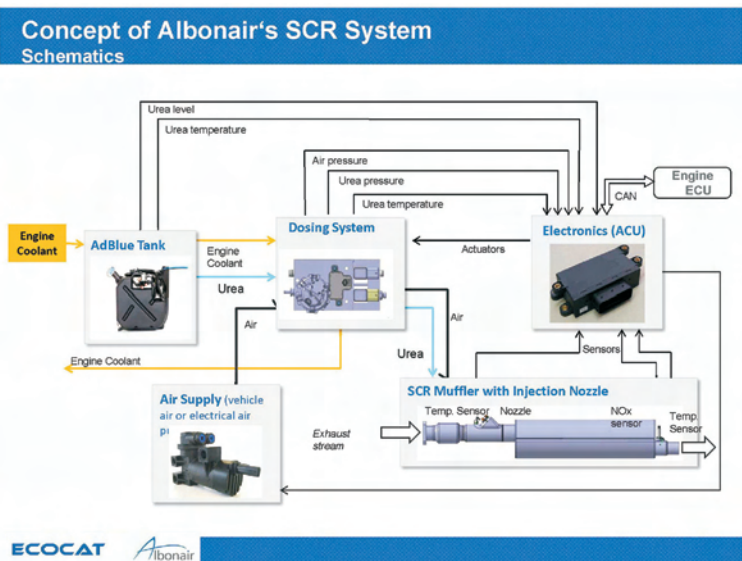


Fig. 14. A concept of Albonair's SCR system, showing the key elements, mass flows and associated control parameters

air is a critical component for SCR mixture formation and air consumption demands must be taken into consideration. Urea dosing is also important and must be closely controlled – if done incorrectly, the efficiency of the system can be dramatically reduced. Multiple concepts exist for injecting AdBlue; the concept which was decided upon exhibits low air consumption and no crystallizing and depositions of the AdBlue liquid in the system. This system improves the size distribution of the droplets and consequently the evaporation profile, which is important as uniform urea distribution and decomposition must be achieved before entering the SCR catalyst if the system is to function effectively. The entire SCR system does produce some backpressure, but the value is within acceptable limits.

Chris Whelan (WDL, UK) – Design and development of a turbo-expander for charge air cooling

downsizing has usually been accompanied by charging of engines, in order to maintain drivability and performance characteristics. However, despite the obvious conceptual link between turbocharging and performance, turbochargers can play a role in reducing emissions and even fuel consumption. Aftertreatment systems eliminate pollutants following their formation within the cylinder; certain solutions could be described as ‘pretreatment systems’ as they prevent the formation of pollutants in the first place. Refrigerated turbocharging is not a new idea, but it was only recently that it became possible (at least theoretically) to apply to automotive applications. (It can also be used off-road on machinery and similar applications.) The turbo expander’s role is to cool the charge air drawn into the intake system. The turbo cooling system consists of a turbo-expander and an additional charge air cooler. The specific requirements are that it increase (or at least maintain) the density of the intake air, but substantially reduce the temperature of the air. The two-step charge air cooling system permits these goals to be achieved (Fig. 15). The effect of the resulting temperature drop can be to improve various combustion and emission parameters at high load, which can mitigate some of the negative side-effects of downsizing. To facilitate the development of a charge air cooling system, a one-dimensional modelling was used; experimental results were found to agree well. From a realistic starting model, the new system was added, and full load power curves simulated. Next, a 3-D model was employed to further investigate the effect on combustion and in-cylinder processes. A limited time range was considered – from the closing of the intake valve to the opening of the outlet valve. Fuel spray and temperature distribution was modelled separately to complement the first models. Operation of the system is self-sustaining, simple and effective – the intake air enters the cylinder at a low temperature and a managed pressure. Heat obtained by reducing the temperature of the charge air provides up to 18 kW of power to drive the compressor. The benefits

are less pronounced at lower loads, as the energy available is proportional to the square of the mass flow. The system uses an air bypass with a sensor and closed loop control to maintain the desired temperature; temperatures drops of up to 60 degrees are achievable. The size, weight and heat rejection of the system are all unproblematic. The main result is reduced NO_x formation – up to around 15%, depending on the engine operating point. A 20% reduction in the soot was also observed, despite the fact that there is normally a trade-off between formation of these two pollutants. This device could be of benefit for future low temperature combustion concepts (HCCI and others). Very highly boosted engines suffer detonation through a process which is not yet well understood, but this system controls the process and keeps operation stable. Other benefits can also be obtained: reduced fuel enrichment (20-30% less at high load), with benefits for fuel consumption and emissions. Testing performed under real-world conditions agreed with simulation studies which had been carried out previously and showed good performance under a range of conditions.

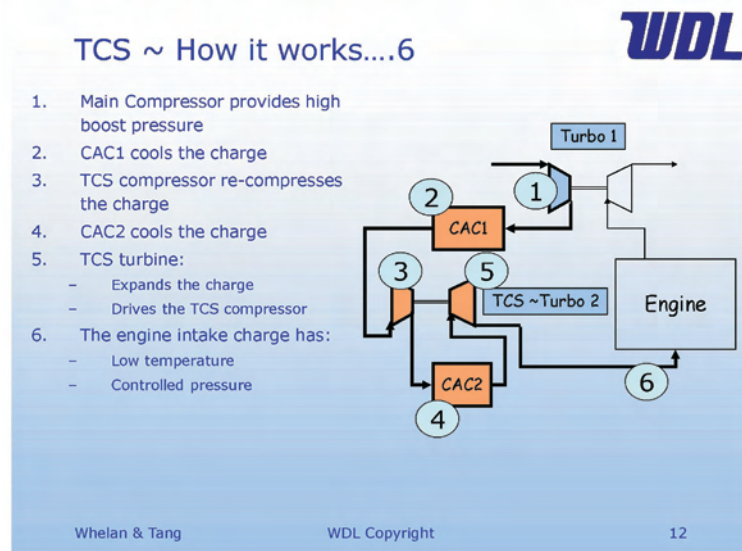


Fig. 15. A concept of WDL’s turbo-expander charge air cooling system

2nd day – Session 4 – Particle number & particle size distribution measurement development

Chair: Dr. Bianca Maria Vaglieco (Italy)

Dr. Thomas Krinke (TSI, Germany) – Transient measurements of particle size distributions from engine exhaust

A number of factors affect the formation and properties of particles in automotive exhaust, including fuel, lubricants, engine type, engine management, aftertreatment systems, etc. Monitoring of particle emissions under transient operating conditions (for example: over the NEDC) can provide information on a range of topics relating to emission of particles from engines. Particle size distributions are qualitatively and quantitatively different depending on which metric is used to weight the curve (number, surface area of mass). The

UN-ECE PMP particle number counting procedure in fact excludes most particles in terms of number. The measurement process is sensitive to external effects and the sample can change substantially between being sampled and being analysed. Size-selective losses, coagulation, condensation and nucleation can all affect the particle size distributions when the sample is transported; Teflon tubes can even act as particle filters. Dilution and thermal conditioning can reduce these problems, if performed correctly. Particles often behave unpredictably and do not follow the streamlines of the gas in most cases. The particle size-number distribution is a strong function of the temperature at which the thermodilution process is performed. Size distributions also vary by sampling point – the in-cylinder distribution is markedly different from the distribution at the tailpipe (Fig. 16). Significantly smaller particles are found in the cylinder. Typical profiles have changed with engine and ATS

technology permits measurement down as far as 2 nm. In fact, measurement can be performed on “particles” so small that their status as a particle could be questioned, leading to doubts over the accuracy of the “particle” count where very small particles are concerned.

Panu Karjalainen (Tampere University of Technology, Finland) – Vehicle technologies and nucleation mode particles

Particles present in urban environments come from several key sources. Nucleation mode particles are not legislated directly, but contribute to PM and PN emissions, which are regulated for some engine types. Under real world driving conditions, nucleation mode particles dominate particle number concentrations and their formation is a function of a wide range of variables and parameters (Fig. 17). The size profile of the nucleation mode and accumulation mode vary considerably. Controlled experiments can be performed to

assess the impact of fuel, lubricant, ATS, driving conditions, engine operating point on particle formation. Alternatively, vehicles can be “chased” on the road to obtain data on their particle emissions. A thermodenuder is the best way to obtain a sample containing no volatiles. Dilution parameters can be fixed such that they replicate the real-world dilution process which occurs in the atmosphere. Interactions between sulphuric acid and water form semi-volatile nucleation mode particles. Different types of particles have different charge profiles. Differences in the profile of particle emissions are observed between Diesel and GDI engines, as well as between engines of different engine size. Reduced emissions have meant that the contribution of the lubricating oil to particle emissions has become greater and greater. Reducing the amount of idling can reduce emissions of certain types of particles, since for light-duty engines non-volatile nucleation mode

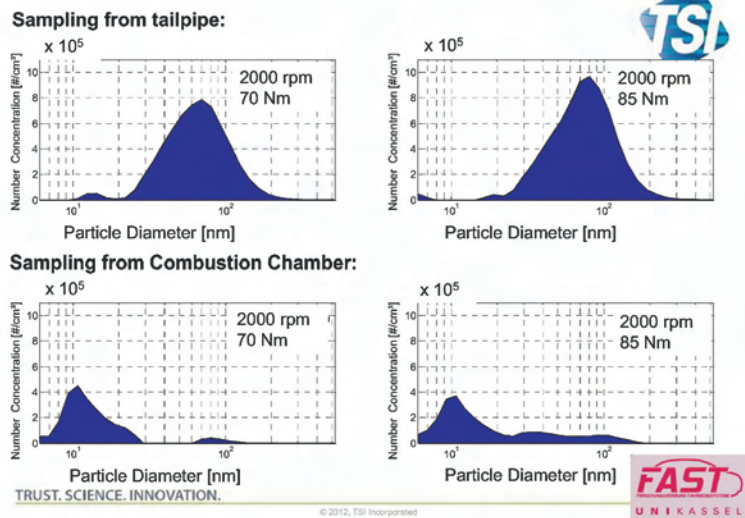


Fig. 16. Particle size distributions measured in the cylinder and at the tailpipe

technology – specific size distributions used to be visible during the NEDC (Euro 3); but these are no longer visible. Various measurement systems are available, for performing steady-state or transient measurements. An EPS system measures everything present in the sample, from tiny aerosols of volatile hydrocarbons to heavy soot agglomerates. Microsoot sensor results can be compared with these results, although the metric measured by the two instruments classes is not the same. Experiments on engines burning hydrogen reveal the contribution of lubricating oil to particle formation, which is of considerable interest in particle formation studies. A nanoparticle surface area monitor can be used to measure surface area via use of a diffusion charger which reports a current proportional to particle surface area. While not called for by the legislation, measurement of particles < 23 nm diameter is achievable: current

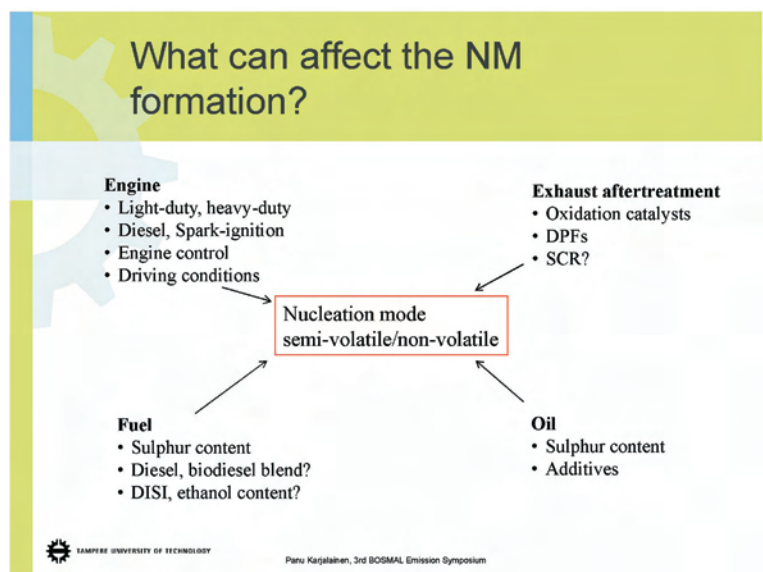


Fig. 17. Factors affecting nucleation mode particle formation

particles are emitted at low load and idle. Precursors to particle formation can be stored in ATS, and then released, causing a wave of particles to pass through the exhaust system. Metals from the powertrain, oil and fuel supply systems may be at the heart of the cores of non-volatile particles. Many particle types which are known to exist in real-world exhaust emissions are not captured for quantification in the PMP PN measurement procedure. Multiple questions and areas of investigation regarding nucleation mode particles and their formation, including the origin of non-volatile cores, the impact of SCR systems, direct injection petrol vs Diesel and atmospheric processes and the ultimate fate of the particles. It is difficult to say if any kind of particle poses no threat to human health – very small particles are generally viewed as not particularly damaging, but exhibit very high penetrating ability.

Dr. Bianca M. Vaglieco (Istituto Motori-CNR, Italy) – Particle size distribution in internal combustion engine fuelled with different biofuels

The particulate pollution emitted by internal combustion engines consists of a mixture of different types of material, depending on various factors (fuel, engine type, temperature, etc). Different types of combustion (low temperature, standard Diesel, HCCI) generate particles of different size profiles. While particles are generally non-spherical, they are treated as perfect spheres to simplify analysis and make it possible to speak of a particle diameter. Fuel pyrolysis products undergo a range of processes to grow in size from the size of a single organic molecule to coagulated soot particles 20-30 nm in diameter (Fig. 18). Comparisons between different measurement systems and different sampling points provide information on particle formation, characteristics, etc. A series of tests was conducted to investigate particle formation in engines using conventional and alternative fuels. Both in-cylinder and exhaust studies were carried out. The presence of a DPF and the injection pressure and timing all significantly impacted the particle size distribution. SI engines are generally considered to be clean, but their particle emissions have been studied. A TWC changes the size profile in the range <30 nm. A bimodal distribution was observed in one study. The first peak is transparent to some types of light; the second peak corresponds to soot. The first peak appears to be made of organic nanoparticles; recent work has shed some light on their formation and characteristics. It is sometimes stated that using ethanol in SI engines is good regarding particle emissions, but this may be in doubt. Pure ethanol was tested and found to produce lower numbers of particles overall, but greater number of smaller particles. Regarding petrol-ethanol blends, there are benefits and penalties, and some evidence of a trade-off. Engine warm-up also has an effect – the evolution of the temperature of the engine coolant is reflected in particle emission trends. Biofuels age very quickly compared to fossil fuels, and this too is reflected

in the particle emissions. From the particle point of view, the impact of biofuels (ethanol blends, biodiesel, ethanol in Diesel) remains to be fully evaluated. Another topic of interest and considerable relevance for the near future is the development of PM aftertreatment system for direct injection petrol engines – practical, effective solutions will have to be developed, thanks to the demands of forthcoming legislation.

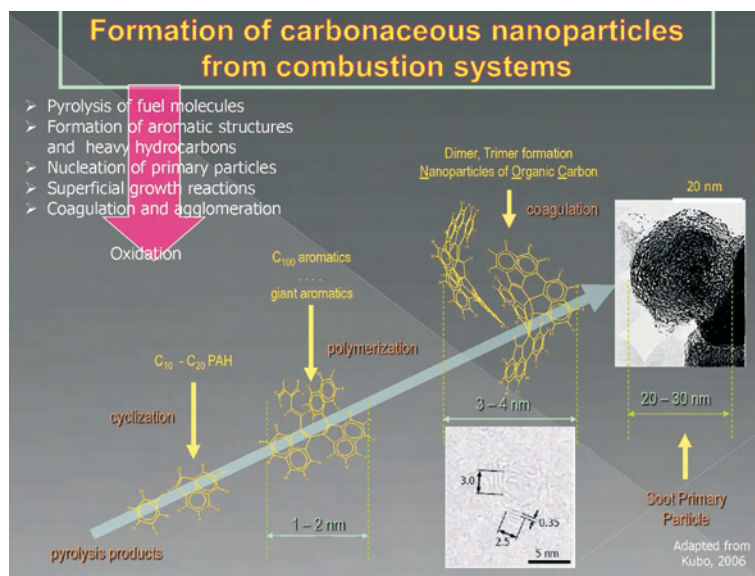


Fig. 18. The chemical and structural evolution of a primary soot particle in an ICE

Session 5 – Fuel and engine oil development

Chairs: Professor Jerzy Merkisz (Poland) & Professor Mirosław Wyszynski (UK)

Roberto Peirano (Petronas Lubricants, Italy) – Racing fuels pre-screening test bench methodology

While most fuel development work has focussed on reducing emissions and complying with fuel quality regulations, work also continues on development of fuels for motorsport applications. For such projects, the aims are to maximise power output, while maintaining fuel consumption at reasonable levels. (Reducing fuel consumption eventually leads to a positive impact on vehicle weight.) Pre-screening using modelling and testing is necessary to identify viable candidates. The process is required to be quick and cost-effective. A base ECU calibration was used, and later optimised for the racing application (very high load), with testing conducted on both calibrations using a methodology developed in-house for this very purpose. A motorcycle engine was selected due to its high rotational speed and high piston speed. A fuel matrix was constructed and populated with fuels with different physicochemical characteristics (density, oxygen content, octane rating, etc), in order to assess the impact of these properties on power output and fuel consumption. While some evidence of trade-offs was observed, a number of candidate fuels showed power increases approaching 2 kW and appreciable reductions in fuel consumption (Fig.

19). Comparing the reference fuel and various candidate fuels, some evidence of trade-offs was observed. A range of combustion parameters obtained from a combustion indication system were also used to assess the performance of the candidate fuels. It was determined that the test methodology and the motorcycle engine selected for the prescreening study were appropriate tools for rapidly determining the suitability of various candidate fuels. Thanks to the data collected during the prescreening study, a limited-number of high-performance fuels can be selected and subjected to further testing.

20). However, once the engine has been cleaned, it cannot be cleaned any further, and no further changes will be observed due to the effect of the deposit control additive. Deposit debris combusts, and this increases soot emissions, but eventually all of it is removed and soot returns to normal levels. The overall fuel consumption reduction observed was on the order of 1% – a significant achievement, and a finding of interest, particularly for fleet operators, but also for individual consumers (albeit on longer timescales). Most of the test cars showed higher power and torque results,

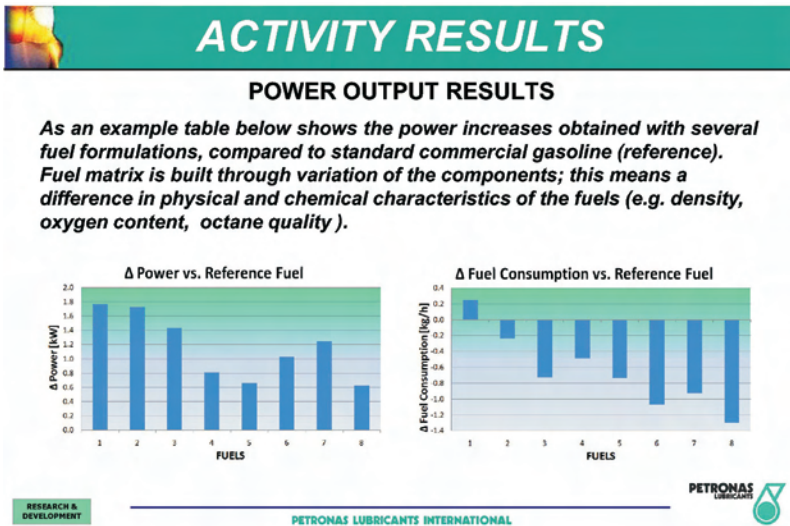


Fig. 19. Power output and fuel consumption results, presented in comparison to the pre-screening programme reference fuel

Knut Skårdalsmo (Statoil Fuel & Retail, Norway) – Evaluation of a premium diesel deposit control additive

Since deposits have an adverse affect on the operation of Diesel engines, there is considerable interest in the use of additives in Diesel fuel which remove such deposits and prevent further formation. However, as with the addition of any additive to the fuel, testing must be performed to determine what the deposit control additive do to the engine, its emissions and its fuel economy. Common rail Diesel engines are very sensitive to deposits in the injectors and standardised tests exist to measure the impact of additives on power output. A test programme was designed by Statoil and executed at BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd. The aim was to perform the test on European vehicles, measuring emissions and fuel consumption as well as power. The NEDC drive cycle was used to have meaningful emissions results and the road phases testing used a variety of driving cycles to give data on the mid- to long-term fuel consumption benefits and any possible drivability penalties. There was evidence that the additive was effective – reduced emissions were observed (Fig.

with the exception of one vehicle. This is concordant with the action of the additive in removing deposits and improving the injection process and overall engine efficiency. The increases in power and torque were judged to be detectable by the average driver. The fuel consumption benefits were similar for both base fuels tested. The full-load power and torque curves also showed visible differences. Power loss (dirty up and clean up) tests were also performed (using the well-known DW10 procedure). After 32 hours, the power loss approached 4%; the additives returned power output to close to its original value within around 8 hours, and the power value finally stabilised at a power loss value of around 0.5% (not detectable by the driver). The DW10 test appears to be a good test procedure for evaluation of this additive type, and the additive was shown to be effective at preventing the zinc in the doped fuel from forming deposits.

It was shown that removing engine deposits improves emissions, fuel consumption, power and torque (at least once the system has stabilised); however, the relatively low statistical significance of the results must be considered, given that changes are on the order of 0.5-3%.

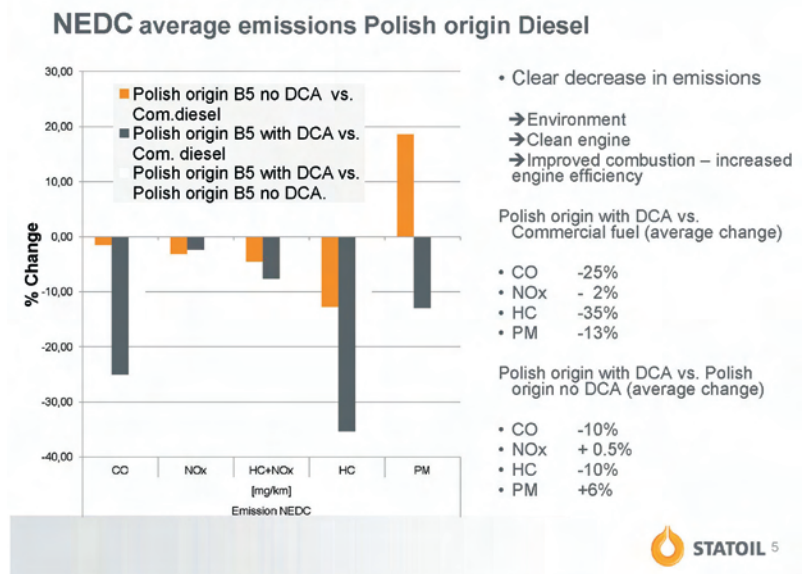


Fig. 20. Emissions benefits gain through use of the deposit control additive

Professor Mirosław Wyszynski (University of Birmingham, UK) – Speciation of gaseous emissions, solid particulates and deposits using GC-MS and TGA-GC-MS

Speciation is important to gain data on the emission of individual hydrocarbons, as their toxicity and status as carcinogens varies from compound to compound. Other compounds (such as toluene) are not carcinogenic, but are of interest due to their propensity to participate in reactions which produce other hydrocarbons. A single-cylinder engine was set up to perform measurements, with a gas chromatography/mass spectrometry unit employed to provide hydrocarbon speciation data. This setup revealed a range of hydrocarbons in the exhaust, including simple alkanes, iso-alkanes, aromatic compounds and some larger molecules. Repeat measurements performed with mixtures of various biofuels revealed substantial changes in the exhaust gas hydrocarbon speciation. Concentrations varied significantly according to the fuel used. The higher of the two injection pressures tested also lead to reduced emissions of every hydrocarbon species. Interestingly, significant amounts of toluene were detected for a fuel with zero toluene content, raising questions over the origin of heavier hydrocarbons. An isooctane-toluene blend was tested; the range of detectable species in the exhaust was very limited for this fuel type. Petrol-ethanol blends up to E30 were also tested, and the results were judged to be favourable, with reductions in the concentrations of all species identified, particularly toluene, although the magnitude of these reductions depend strongly on load. Higher ethanol blends cause emissions of certain hydrocarbons to almost disappear. A speciation analysis conducted on standard petrol, a petrol blend containing 10% ethanol and a blend containing 10% dimethylformamide revealed the blended fuels caused somewhat lower emissions of a wide range of hydrocarbons (Fig. 21). Thermogravimetric analysis can be used to perform an analogous procedure for PM collected on filters. Different weight loss profiles were obtained for PM produced by a CI engine tested using RME and ULSD fuels.

Results

Speciation of C₃-C₇ hydrocarbons with 10% fuel blends at low load

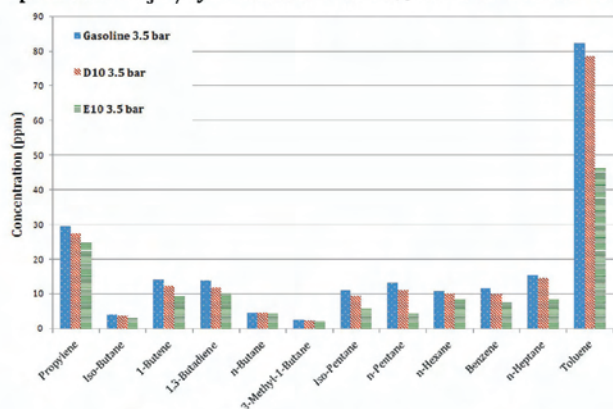


Fig. 21. Hydrocarbon speciation for three fuel types tested at a single load point

A sample of the stained filter is heated in an inert atmosphere and then exposed to an oxidising atmosphere, all the while being monitored for mass loss, leading to creation of a characteristic thermal mass loss profile. Very different profiles were obtained for tallow-based biodiesel and standard Diesel, suggestive of markedly different hydrocarbon speciation on the filter. However, the methodology is still under development, and there remains room for improvement. One of the main problems is dealing with very small samples – a few mg, nothing more – although the method appears to generate meaningful results. The NIST database was used to identify individual hydrocarbons in the PM material. PAH were also detected in the PM material and this is an important area for future investigations.

Dr. Zdzisław Cieslikowski (Orlen, Poland) – Is LPG really competitive to petrol?

LPG is currently the most widely-used alternative fuel for ICE. In 2010, some 2.5 million vehicles in Poland were equipped to use LPG, serviced by around 6000 LPG filling stations – 2.4 stations per thousand vehicles, although this ratio has dropped rapidly as many smaller station which offered LPG have had to close. Still, the fuel remains widely available in Poland (and in many other countries). LPG is generally recognised as presenting a range of advantages and disadvantages regarding usage in modern ICE. The advantages range from a high fuel octane rating and improved mixture formation to a broad ignition range; the disadvantages include increased temperatures, reduced power output and reduced energy density. A project was performed to determine the impact of LPG on emissions, durability, performance and long-term cost implications, using third generation LPG supply systems. After accumulating 60 000 km of mileage, inlet valve deposits were some 16 times greater (by mass) for the vehicle running on LPG than the vehicle running on standard petrol. Commercial gasoline contains a range of additives for inhibition of corrosion, deposit formation, etc, but these are completely absent from LPG. When using LPG, heavy

deposits must generally form from the lubricating oil. (However, low-quality imported LPG may contain impurities including hydrocarbons from pumps, etc.) Volumetric consumption of LPG was found to be higher – as much as 40% higher at high speeds. Emission of HC was found to be lower at low mileage, but by the time the vehicle had accumulated more miles, this situation had reversed (Fig. 22), (due to reduced performance of the vehicle's TWC). Regarding emissions of CO and NO_x, emissions were appreciably higher when running on LPG through the mileage accumulation programme. Long-term operation on LPG reduced the effectiveness of the TWC for all of HC, CO and NO_x, although it should be noted that the TWC fitted to the test vehicle was not produced for LPG-specific applications. Slightly reduced power and acceleration results were obtained; the power loss measured would be easy to feel when overtaking under highway



conditions. The cost of LPG has been consistently lower than that of petrol, with the ratio of the costs of the two fuels remaining relatively constant for the last few years. However, increased costs are incurred related to engine servicing and replacement parts resulting from usage of LPG. It should be remembered that the engine starts on petrol, and only switches to LPG when a certain temperature has been achieved. Fuel economy, savings and engine wear will vary as a function of journey length and the number of times the engine is started each year. Future distribution of LPG as an automotive fuel depends on cost as the main factor.

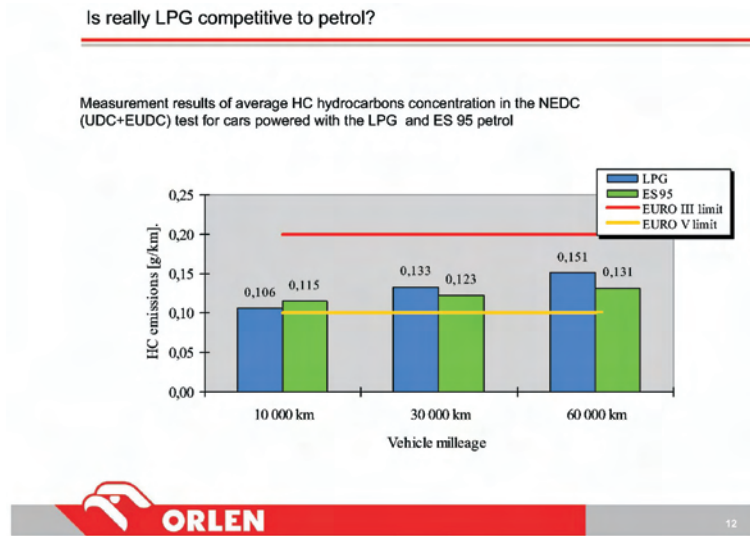


Fig. 22. The evolution of HC emissions from a vehicle running on petrol and LPG over the mileage range 10 000 – 60 000 km

Dr. Mathias Woydt (BAM, Germany) – DOW PAG engine oil – Fuel economy through engine oils based on polyalkylene glycols

Demands placed on engine oils have increased significantly, and will be more so in the future. Efforts to reduce fuel consumption and CO₂ emissions rely to a certain extent on the ability of advanced lubricants to reduce friction. Poly-alkaline glycol (PAG) was first used in fighter-planes some 60 years ago, as it was found to prevent clogging of the oil pump with soot. In contrast to hydrocarbons, polyglycols contain significant amounts of oxygen. The presence of these oxygen atoms makes the molecule polar, thereby increasing lubricity. One disadvantage is that PAG are miscible with oil, but this can generally be overcome with the use of additives. Depending on the blend and the particular molecules chosen, a wide range of properties can be obtained in the synthetic oils. Combustion of PAGs is ash free (of considerable interest for vehicles featuring DPF systems). The synthetic oil's low temperature viscosity is determined by the backbone of the molecule. Engine bench testing revealed notice-

able reductions in entrained friction across the engine map, and further benchmarking tests revealed fuel consumption benefits at 5 of the 6 operating points tested. Road testing in a passenger car revealed that over the entire lifetime of the oil, 0.73-1.48% less fuel would be consumed, depending on the base oil used for comparison. Road testing on a fleet of heavy-duty vehicles revealed a variety of changes: fuel economy increases as high as 5.2%, very low concentrations of wear metals, power increases and lower operating temperatures (some 8-9 K). Reduced wear was measured for some components. Stribeck curves showed the differences to be substantial. The non-zero shear of the oil surface using PAG is a major difference, and this explains the improved performance at high tribological velocities. Under high shear conditions (where the potential for metal contact and wear is greatest), the dynamic viscosity of the PAG oil was shown to be significantly greater than for other oil types (Fig. 23). Other benefits include higher thermal conductivity and better overall heat transfer. Using low friction oils can be a much more cost-effective CO₂ reduction measure than reducing vehicle weight – or both could be performed simultaneously to achieve a substantial drop in CO₂ emissions. Where polyglycols are present in fuel they can even reduce soot formation, and so any oil burned in the engine does not cause emissions problems. Despite the fact that the current lubricating oil specifications were written for hydrocarbon-based oils, the new PAG oils meet all relevant SAE standards and have the potential to deliver a wide range of harmonious effects. There are various production methods and feedstocks from which to produce PAG, and this innovative synthetic oil type will certainly be of great interest in the near future.

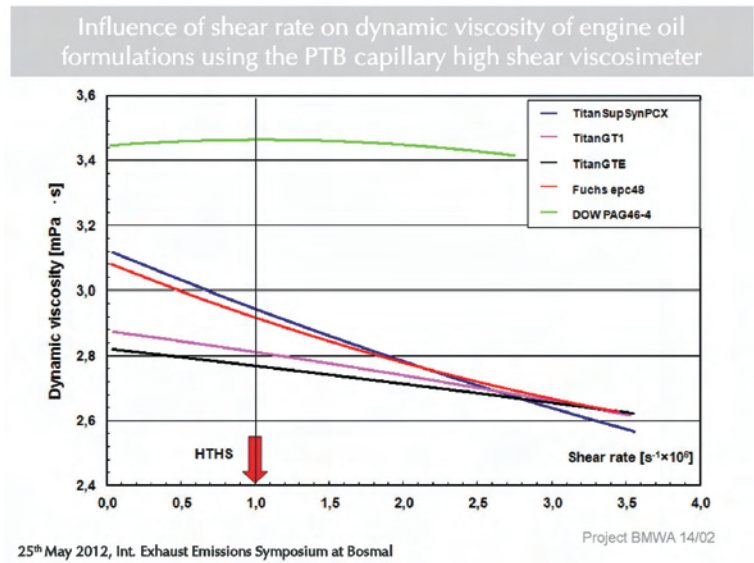


Fig. 23. Dynamic viscosities of a range of oil types under high temperature/high shear conditions

Dr. Massimo Manni (Eni, Italy) – An environment-oriented approach in the development of passenger car engine oils

The automotive community today finds itself facing three general goals: high fuel economy, high compatibility and high performance. Engine oil has a part to play in all three of these areas. Some of these goals are in conflict with each other. For example, sulphur in the oil helps keep fuel consumption low, but conflicts with ATS requirements and the oil exerts an impact on emissions via compatibility with ATS. Reducing fuel consumption is a topic with multi-faceted benefits; the oil SAP content is important in this area, and reducing the value of this parameter is a well-known

required for the future with new oil concepts and categories. Three new viscosity grades may be created to cater for the new technologies. However, oil viscosity also has an impact on oil consumption (although it is not the only controlling parameter) and so the basestock must be carefully selected to control the rate of oil consumption. The use of recycled components and molecules of biogenic origin are options for improving the sustainability of lubricating oils. Such oils have also been shown to keep the pistons very clean, compared to less advanced alternatives. Research will come to focus on individual components in the continuing drive to develop ultra low viscosity oils that are compatible with current and future engine-ATS combinations.

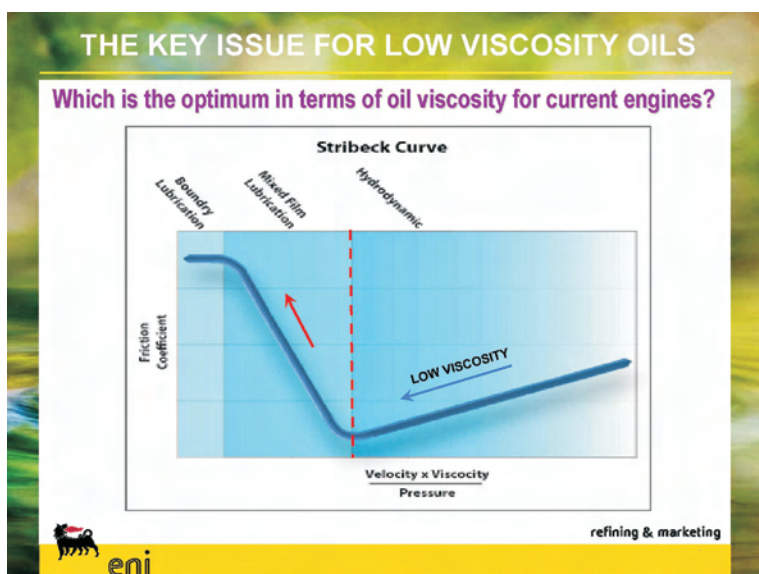


Fig. 24. A qualitative Stribeck curve showing the theoretical optimum viscosity for an engine oil

strategy. OEM interest in revised oils is increasing, with Ford interested in advanced oils as an original fill option for its heavy downsized 3-cylinder 1.0 l EcoBoost engine. Low and ultra low viscosity oils are one of the main solutions regarding achieving very low fuel consumption. Vehicle featuring S&S and full hybrid systems require low viscosity oils, as the number of engine start-up events is much greater. Additives have an important part to play, but must be chosen with all goals in mind, and some level of compromise has to be reached between requirements which are in conflict. The potential conflict between fuel consumption and wear deserves close examination (Fig. 24). Many existing cars have to use traditional oils. However, the ecological credentials and environmental sustainability of established oil types can be improved, for example: no PCB content, compatibility with ATS, etc. The current limit for oil viscosity is 2.7 cP for, according to SAE standards. There is currently a lack of harmonisation on oil specifications and updates will be

Written papers (no oral presentation)

Dr. Piotr Bielaczyc, Dr. Antoni Swiatek, Dr. Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn (BOSMAL, Poland) – An analysis of ammonia emissions from light-duty vehicles operating on gasoline, liquefied petroleum gas (LPG) and compressed natural gas (CNG)

Vehicular ammonia emissions are currently unregulated, even though ammonia is harmful for a variety of reasons, and the gas is classed as toxic. Ammonia emissions represent a serious threat to air quality, particularly in urban settings; an ammonia emissions limit may be introduced in future legislation. Production of ammonia within the cylinder has long been known to be very limited. However, having reached its light-off temperature, a three-way catalyst can potentially produce substantial quantities of ammonia (Fig. 25) through various reaction pathways. Production of ammonia is symptomatic of overly reducing conditions within the three-way catalyst (TWC), and depends somewhat upon the particular precious metals used. Emission is markedly higher during periods

- Intake air typically contains <1 ppm of NH₃
- Formation of NH₃ in the cylinder is very limited
- Under certain conditions, a three-way catalytic aftertreatment system can produce substantial quantities of NH₃ (22%-27%, up to 80% of total RNCs**)

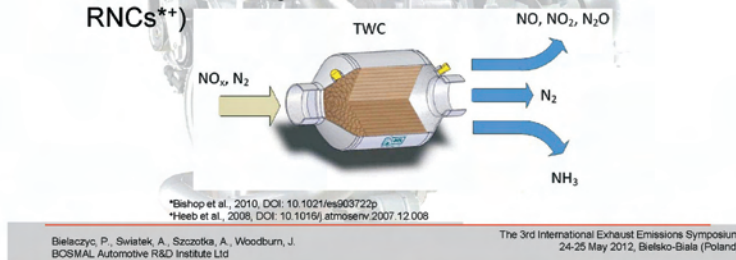


Fig. 25. The flow of nitrogen atoms and NO_x through a TWC, resulting in the formation of compounds including ammonia

where demand for engine power is higher, when the engine will be operating under open-loop conditions. The air-to-fuel ratio, cylinder temperature and rate of availability of carbon monoxide and nitrogen monoxide all correlate to varying degrees with ammonia production. A series of tests was performed to study ammonia emissions data from three European passenger cars, using three different fuels, with varying physicochemical characteristics and carbon:hydrogen ratios, namely gasoline, LPG and CNG. All vehicles were tested on BOSMAL's chassis dynamometer over the New European Driving Cycle, with undiluted ammonia quantified directly at tailpipe. Both cycle mean emission factors and second-by-second data were considered. The results indicated a degree of correlation between ammonia emission and demand for engine power, for example upon commencing acceleration and following gear shifts. Emission over the entire driving cycle was found to vary depending on the fuel used, and between the three test vehicles. One vehicle emitted 93% more ammonia when operating on gasoline than on CNG; the other vehicle emitted 2% more ammonia when running on LPG than on gasoline. A simple numerical correction implied that the lower carbon:hydrogen ratio was at least partially responsible for the minimal ammonia emissions observed when running on that fuel.

Dr. Piotr Bielaczyc, Dr. Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn (BOSMAL, Poland) – An investigation of different gasoline-ethanol blends' influence on performance and exhaust emissions from a light-duty gasoline vehicle

The possibility of using bioethanol blends (mixtures of gasoline fuel and ethanol derived from biomass) of varying strengths in unmodified vehicles featuring gasoline engines is a topic of great interest in efforts to make fuel consumption more sustainable and reduce emissions. A series of tests was carried out using different proportions of bioethanol in the fuel (E5, E10, E25, E50 and E85) on the emission of gaseous pollutants, such as: carbon monoxide, hydrocarbons, oxides of nitrogen and carbon dioxide, with testing performed at normal (22 °C) and low (-7 °C) ambient temperatures. All emissions testing was performed on a chassis dynamometer over the NEDC; engine performance metrics were also tested. Tailpipe emission data suggested that modest improvements in air quality could result from usage of low-to-mid ethanol blends in the vehicle tested. In general, blends up to and including E50 were relatively unproblematic; emissions of regulated compounds and CO₂ were in some cases substantially lower for ethanol blends higher than E5 (standard European gasoline). This finding has potentially significant implications for air quality scenarios regarding potential greater usage of ethanol blends. However, the usage of two ambient temperatures in this study confirmed previous findings that such emissions reductions are in some cases strongly temperature dependent, and further testing

Results: HC, CO, NO_x and CO₂ emissions

Percentage changes in tailpipe emissions of HC, CO, NO_x and CO₂ over the NEDC test at -7°C in comparison to emission at 22°C

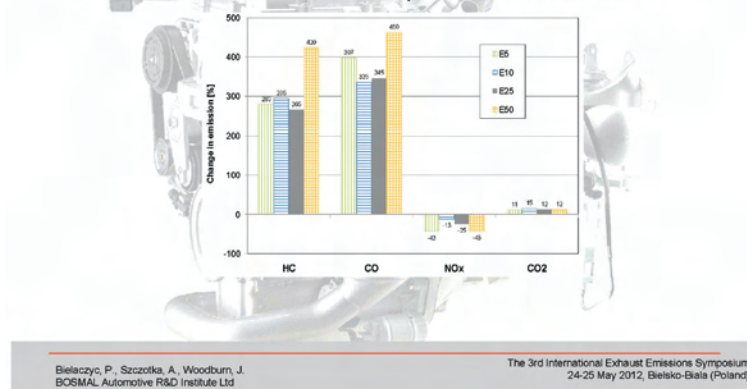


Fig. 26. The flow of nitrogen atoms and NO_x through a TWC, resulting in the formation of compounds including ammonia

is required in this area. The relative deterioration of emissions performance at low temperature varied from blend to blend, but interestingly the fuel consumption increase was very similar for all four test blends (Fig. 26). Overall, no single blend emerged as a clear best or worst performer at either test temperature. Although maximum engine power and torque values for all blends were very similar, it was observed that for the E5 blend, engine power and torque were the highest, whereas for the blend E10 they were the lowest. The maximum power for the blend E10 was some 2% lower (significant at the 95% confidence level) in comparison to results obtained for the E5 blend.

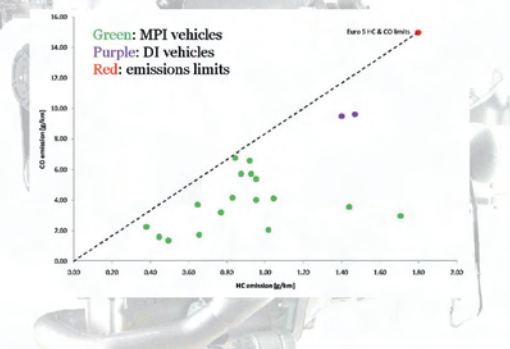
Dr. Piotr Bielaczyc, Dr. Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn, BOSMAL, Poland – An analysis of low ambient temperature conditions' influence on excess emissions and fuel consumption from modern spark ignition passenger cars

Cold starts are demanding events for spark-ignition (SI) internal combustion engines. Indeed, start-up events are the most fundamental transient events experienced by automotive engines as the numerical values of engine speed and fuel consumption change from zero to non-zero values in a very short space of time. When the temperatures of the engine oil, coolant and the engine block are close to the ambient temperature, start-up can be difficult to achieve without fuel enrichment, which results in significant excesses in exhaust emissions and fuel consumption. In general, the lower the ambient temperature, the more substantial these problems are. Many nations frequently experience sub-zero ambient temperatures, and the European Union (among others) has specified an emissions test at low ambient temperature (-7 °C). Passenger cars typically experience one to two cold start events per day, and so both cold starts and the warm up period that follows are significant in terms of exhaust emissions. A series of tests were performed a pool

of 19 European passenger cars on a chassis dynamometer within an advanced climate-controlled test laboratory at BOSMAL Automotive Research and Development Institute, Poland. Emissions data obtained over the Urban Driving Cycle by testing at 24 °C and at -7 °C, are presented for a selection of modern Euro 5 gasoline vehicles representative of the European passenger car fleet. A full modal emissions analysis was also conducted at 24 °C and at -7 °C over the New European Driving Cycle. Emissions and fuel consumption were substantially higher at -7 °C than at 24 °C. The results indicated substantial deteriorations in emission performance at the lower test temperature, however, all test vehicle easily met the relevant legislative limits by a wide margin, particularly for emissions of CO (Figure 27). Emissions responses from direct and indirectly injected petrol engines were found to be different. A finding of significant interest was that the CO₂ emissions increase at -7 °C was relatively modest and significantly smaller than other values reported for research performed on slightly older vehicles.

Results: HC & CO emissions

A scatter plot of HC and CO emissions factors for all vehicles, tested over the UDC at -7°C, presented in comparison to the emissions limits for HC and CO.



Bielaczyc, P., Szczotka, A., Woodburn, J., BOSMAL Automotive R&D Institute Ltd. The 3rd International Exhaust Emissions Symposium, 24-25 May 2012, Bielsko-Biala (Poland)

Fig. 27. A comparison of HC and CO emissions results obtained at -7 °C, presented in comparison to the relevant legislative limits

Symposium summary

Professor Jerzy Merkisz (BOSMAL/Poznan University of Technology, Poland)

Professor Jerzy Merkisz, the current chairman of BOSMAL's Advisory & Scientific Boards, concluded the symposium by mentioning certain key themes which had surfaced in the proceeding presentation sessions and offering his own comments on the overall technical message of the 3rd International Exhaust Emissions Symposium. Internal combustion engines have been, are and will be the main solution for transportation for the foreseeable future. However, the ICE concept has certain key existential challenges to overcome; powertrain development is moving the direction of reduced levels of emissions of harmful

compounds and CO₂ emissions. Various tools, as described during the symposium, are available to meet these goals. Refinement, improvement and implementation of these devices and techniques for emissions reduction and fuel economy is the current task facing engineers working in the automotive industry.

Conclusions

Presentations delivered at this year's event covered topics of interest to the automotive audience from a variety of standpoints. A theme which surfaced repeatedly was the need to consider systems (engine, fuel, lubricants and vehicle characteristics (e.g. weight)) in context, as integral components of the supersystem (the complete vehicle, the environment and which it operates and its range of operating duties). Events such as the symposia hosted by BOSMAL facilitate and foment inter-disciplinary dialogue between engineers and scientists working in related but distinct fields, which is essential if the aforementioned vision of integrated research, development and technical progress is to be realised. The sheer numbers of passenger cars on the roads globally mean

that they have a relatively large impact on the environment, but over time the impact per vehicle has been reduced massively. Current and future legislation will insist on further reductions and there remains a great deal of work to be done in terms of finding, testing, developing, certifying and implementing viable solutions. Emissions of regulated compounds from light-duty vehicles are now so low that in some cases accurate measurement is difficult to achieve. There is now a focus on unregulated compounds and also on emissions during real-world driving conditions. Both these areas of interest have extensive test requirements and represent worthy research directions, which are sure to occupy those working in the emissions world for the foreseeable future.

While operation of surface vehicles is in fact only one aspect of a range of human activities that degrade air quality and emit GHGs, the automotive industry is subject to strict controls and this status is unlikely ever to change. Increasing interest is being shown in air quality issues by politicians, lawmakers and even the general public.

Once again, the annual automotive emissions symposium organised by BOSMAL has proven to be a great success. The social programme organized as an integral part of the conference was once again a highlight of the event and positive feedback regarding the technical and social programmes was forthcoming from participants, both those who had participated in the previous two symposia and those who were participating (and indeed visiting Poland) for the first time.

The proceedings from the 3rd International Exhaust Emissions Symposium have been archived on a CD entitled 'Current and Future Trends in Automotive Emissions, Fuels, lubricants and Test Methods – 2012'.

BOSMAL[®]

Bielsko-Biała, Poland

**3rd International Exhaust Emissions Symposium
and Celebrations to mark BOSMAL's 40th anniversary**

The Symposium Programme

Thursday, 24th May 2012

Symposium Opening

- Antoni Swiatek, President, BOSMAL Automotive R&D Institute

Keynote speaker

- Michael P. Walsh, Board Chairman, International Council on Clean Transportation, USA - **Global Trends in Motor Vehicle Pollution Control - A 2012 Update**

Session 1 - Emissions Legislation/Test Methods Development

Chair: Michael Walsh, USA & Piotr Bielaczyc, Poland

- Piotr Bielaczyc, BOSMAL, Poland - **Automotive Emissions Legislation/Test Method Development Over the Last 40 Years and Future Predictions for the Next 40 Years**
- Les Hill, HORIBA, UK - **Recent Developments and Trends in Exhaust Emissions Legislation**
- Wolfgang Thiel, Technical University Munich, Germany - **Measuring Near Zero Automotive Exhaust Emissions - a Big Challenge**
- Christos Dardiotis, Alessandro Marotta, Giorgio Martini, Pierre Bonnel, Monica Tutuianu, Martin Weiss, European Commission, JRC Energy Institute, Italy - **JRC's Contribution to the Revision of the European Type Approval Procedure for Light Duty Vehicles**
- Kurt Engeljehringer, AVL, Austria - **Emission Test and Measurement Challenges on Hybrid Vehicle**

Session 2 - Powertrain Development/Test Method Development/Hybrids

Chair: Giovanni Cipolla, Italy

- Giovanni Cipolla, Politecnico di Torino, Italy - **Euro 7 Emissions Challenge for IC Engine**
- Ignazio Gentile, FIAT/CHRYSLER, FIAT Powertrain, Italy - **Cylinder Head Integrated Manifold on Gasoline Turbo Engines**
- Eike Martini, AVL, Austria - **Emission Calibration Yesterday, Today and Tomorrow**
- David Mauke, EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Switzerland - **CNG and CNG Hybrid Vehicles: A Potential Concept to Reduce CO2 Emissions?**

Session 3 - Catalyst Technology & Emission Reduction Methods for CI&SI Engines

Chair: Jorge Barata, Portugal & Andre R R Silva, Portugal

- Gerardo Carelli, S. Eckhoff, S. Franoschek, W. Müller, Umicore, Italy/Germany - **Efficient NOx Aftertreatment Technologies for Clean Diesel**
- Silke Jürgens, Albonair, Germany; Toni Kinnunen, Teuvo Maunula, Ecocat, Finland - **Emission Techniques and Related SCR Systems by Ecocat and Albonair**
- Chris Whelan, Wai Chun Tang, WDL, UK - **Design and Development of a Turbo- Expander for Charge Air Cooling**

BOSMAL Automotive Research & Development Institute Ltd
Ul. Sami Stok 93
43-300 Bielsko-Biała
Poland

Phone:+48 33 8 130 539
Fax:+48 33 8 130 441
www.bosmal.com.pl
e-mail: symposium@bosmal.com.pl

BOSMAL[®]

Bielsko-Biała, Poland

**3rd International Exhaust Emissions Symposium
and Celebrations to mark BOSMAL's 40th anniversary
The Symposium Programme**

Friday, 25th May 2012

Session 4 - Particle Number & Particle Size Distribution Measurement Development

Chair: Bianca Maria Vaglieco, Italy

- Thomas Krinke, TSI, Germany - **Transient Measurements of Particle Size Distributions from Engine Exhaust**
- Panu Karjalainen, Topi Rönkkö, Jorma Keskinen, Tampere University of Technology, Finland - **Vehicle Technologies and Nucleation Mode Particles**
- Silvana Di Iorio & Bianca M. Vaglieco, Istituto Motori - CNR, Italy - **Particle Size Distribution in Internal Combustion Engine Fuelled with Different Biofuels**

Session 5 - Fuel and Engine Oil Development

Chair: Jerzy Merkisz, Poland & Mirosław Wyszynski, UK

- Roberto Peirano, Fausto Alberici, Alberto Colombo, Petronas Lubricants, Italy - **Racing Fuels Pre-Screening Test Bench Methodology**
- Knut Skårdalsmo, Bob Seymour, Åsa Håkansson, Statoil Fuel & Retail, Norway - **Evaluation of a Premium Diesel Deposit Control Additive**
- Mirosław Wyszynski, Farshad Eslami, Jakub Piaszyk, Tahee Park, University of Birmingham, UK - **Speciation of Gaseous Emissions, Solid Particulates and Deposits using GC-MS and TGA-GC-MS**
- Zdzisław Cieslikowski, Orlen, Poland - **Is LPG really Competitive to Petrol?**
- Stephen Merryweather, Daniel Zweifel, DOW Europe, USA/Switzerland, Mathias Woydt, BAM, Germany - **DOW PAG Engine Oil - Fuel Economy through Engine Oils Based on Polyalkylene Glycols**
- Massimo Manni, Eni, Italy - **An Environment-Oriented Approach in the Development of Passenger Car Engine Oils**

Symposium summary & closing ceremony

Jerzy Merkisz, Poznań University of Technology/BOSMAL, Poland

Written papers, with poster presentation (no oral presentation)

- Piotr Bielaczyc, Antoni Swiatek, Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn, BOSMAL, Poland - **An Analysis of Ammonia Emissions from Light-Duty Vehicles Operating on Gasoline, Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Compressed Natural Gas (CNG) - written only**
- Piotr Bielaczyc, Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn, BOSMAL, Poland - **An Investigation of Different Gasoline-Ethanol Blends' Influence on Performance and Exhaust Emissions from a Light-Duty Gasoline Vehicle - written only**
- Piotr Bielaczyc, Andrzej Szczotka, Joseph Woodburn, BOSMAL, Poland - **An Analysis of Low Ambient Temperature Conditions' Influence on Excess Emissions and Fuel Consumption from Modern Spark Ignition Passenger Cars - written only**

BOSMAL Automotive Research & Development Institute Ltd
Ul. Sami Stok 93
43-300 Bielsko-Biała
Poland

Phone: +48 33 8 130 539
Fax: +48 33 8 130 441
www.bosmal.com.pl
e-mail: symposium@bosmal.com.pl

Kierunki rozwoju metod ograniczania emisji szkodliwych składników spalin, metod badawczych oraz paliw i olejów – stan na rok 2012

Kontynuując sukces pierwszego i drugiego międzynarodowego sympozjum dotyczącego problemów ograniczania emisji związków szkodliwych spalin ze źródeł motoryzacyjnych, które odbyły się w 2010 i 2011 roku, Instytut Badań i Rozwoju BOSMAL Sp. z o.o. w Bielsku-Białej był organizatorem i gospodarzem III Międzynarodowego Sympozjum Ograniczania Emisji Szkodliwych Składników Spalin (3rd International Exhaust Emissions Symposium), które odbyło się w dniach 24-25 maja 2012 r. w Bielsku-Białej. Sympozjum to było również jedną z kilku uroczystości związanych z czterdziestolecie Instytutu BOSMAL, który jest sukcesorem OBR SM BOSMAL w Bielsku-Białej. W tegorocznym sympozjum uczestniczyli przedstawiciele 47 firm z przemysłu motoryzacyjnego i paliwowego oraz instytutów badawczych i uczelni technicznych z 14 krajów na 3 kontynentach. W czasie sympozjum zaprezentowano referat programowy wygłoszony przez znanego eksperta ds. emisji związków szkodliwych spalin – Michaela Walsha (USA) z ICCT (Międzynarodowej Organizacji ds. Czystego Transportu) oraz 21 prezentacji sesyjnych i 3 posterowe. Na sympozjum wystąpili specjalnie zaproszeni specjaliści z centrum badawczego JRC Unii Europejskiej, przemysłowych centrów badawczych przemysłu motoryzacyjnego i paliwowego oraz środowisk akademickich. Zaprezentowali oni referaty w pięciu sesjach tematycznych dotyczących następujących zagadnień: przepisy prawne i metody badawcze emisji szkodliwych składników spalin silnikowych, rozwój konstrukcji i metod badawczych silników spalinowych i napędów hybrydowych, rozwój technologii systemów katalitycznego oczyszczania spalin silników o zapłonie samoczynnym i iskrowym, rozwój metod pomiaru emisji cząstek stałych (PM) w zakresie ich liczby i średnic, trendy rozwojowe paliw i olejów silnikowych (autorzy i tytuły referatów są przedstawione w zamieszczonym na stronach 113-114 programie sympozjum).

Podczas III Międzynarodowego Sympozjum Ograniczania Emisji Szkodliwych Składników Spalin eksperci z przemysłu motoryzacyjnego, przedstawiciele producentów silników spalinowych, a także ich dostawcy, producenci systemów katalitycznego oczyszczania spalin, specjaliści z przemysłu paliwowego, przedstawiciele instytutów naukowo-badawczych i uczelni technicznych dyskutowali o różnych kwestiach związanych z emisją związków szkodliwych spalin ze źródeł motoryzacyjnych, a także wymieniali spostrzeżenia odnośnie obecnego i przyszłego stanu prawnego dotyczącego ograniczania emisji szkodliwych i toksycznych składników spalin, ograniczenia zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla (CO_2), aktualnych trendów rozwojowych w przepisach i metodach badawczych dotyczących problemu ograniczania zanieczyszczeń spalin z silników spalinowych stosowanych w pojazdach oraz maszynach roboczych. Uczestnicy sympozjum dzielili się wiedzą dotyczącą wielu

zagadnień związanych z lotnymi i stałymi składnikami spalin jak: przepisy prawne obowiązujące w Europie, USA i Japonii, nowe przepisy dotyczące ograniczenia zużycia paliwa i emisji dwutlenku węgla (CO_2), nowe metody pomiaru cząstek stałych (PM) i tlenków azotu (NO_x), a także amoniaku NH_3 , metody pomiaru innych związków chemicznych, które potencjalnie znajdują się w nowych przepisach dotyczących ograniczania emisji, rozwój konstrukcji aparatury badawczej do prowadzenia badań i testów emisyjnych, metody obniżania emisji związków szkodliwych, systemy oczyszczania spalin i systemy katalityczne, metody kalibracji układów sterowania silnikiem, rozwój konstrukcji silników spalinowych i hybrydyzacja napędów, rozwój metod badań silników w aspekcie zaostrzania przepisów i limitów dotyczących dopuszczalnej emisji oraz nowych metod badawczych emisji spalin oraz wyposażenia laboratoriów badawczych. Omawiano nową procedurę prowadzenia badań emisji WLTP i nowy test emisji na hamowni podwoziowej planowany do wprowadzenia w przepisach Euro 7 oraz nowych przepisach japońskich i indyjskich – WLTC, a także nowe wymagania amerykańskie CFR 1065 i CFR 1066, które zmieniają w znaczący sposób podejście do homologacji samochodów i silników na rynku amerykańskim i badań emisji związków szkodliwych z silników spalinowych i samochodów.

Zmniejszenie emisji związków szkodliwych i toksycznych zawartych w spalinach, a szczególnie ważne obecnie zmniejszenie emisji PM i globalnej, antropogenicznej emisji CO_2 są głównymi wyzwaniami dla przemysłu, powodowanymi przez czynniki polityczne, ekonomiczne i techniczne. Osiągnięcie średnio- i długoterminowych poziomów średniej emisji flotowej CO_2 jest bardzo skomplikowanym i kosztownym procesem dla producentów pojazdów, wymagającym zwiększonego inwestowania w prace badawczo-rozwojowe. Jednocześnie przepisy dotyczące emisji szkodliwych składników spalin stają się coraz bardziej restrykcyjne, wliczając w to nowe związki chemiczne, które będzie należało poddać analizie: liczba cząstek stałych i ich całkowita powierzchnia (obecnie ważniejsze parametry niż masa cząstek), aldehydy, tlenki azotu takie jak – NO, NO_2 , N_2O , amoniak – NH_3 , specyficzne związki organiczne, które potencjalnie mogą znaleźć się w nowych przepisach (WLTP, Euro 7, USA Tier 3, CARB LEV III) dotyczących ograniczania szkodliwych emisji ze źródeł motoryzacyjnych w krajach Unii Europejskiej, USA, Kanady, Azji, Ameryki Południowej oraz Australii.

Referaty prezentowane na III Międzynarodowym Sympozjum Ograniczania Emisji Szkodliwych Składników Spalin są zawarte w materiałach konferencyjnych zatytułowanych „Current and Future Trends in Automotive Emissions, Fuels Lubricants and Test Methods – 2012” , ISBN: 978-83-931383-2-6, wydanych przez Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL na płycie CD.

Bibliography/Literatura

- [1] Bielaczyc P., Woodburn J.: Global trends in emissions regulation and reduction. *Combustion Engines*, 3/2010 (142), 3-27, 2010.
- [2] Bielaczyc P. (editor) and 13 co-authors: Global trends in emissions regulation and reduction from the perspective of powertrain and fuel development, *Proceedings of the 1st International Exhaust Emissions Symposium*, ISBN 978-83-931383-0-2.
- [3] Bielaczyc P., Woodburn J.: Analysis of current and future trends in automotive emissions, fuels lubricants and test methods, *Combustion Engines*, 4/2011 (147), 104-118, 2011.
- [4] Bielaczyc P. (editor) and 17 co-authors: Global trends in emissions regulation and reduction from the perspective of powertrain and fuel development, *Proceedings of the 2nd International Exhaust Emissions Symposium*, ISBN 978-83-931383-1-9.
- [5] Mock P., German J., Bandivadekar A., Riemersma I.: Discrepancies between type-approval and "real-world" fuel-consumption and CO₂ values. *ICCT working paper 2012-02*, 2012. Available online: www.theicct.org

Abbreviations and definitions

ATS	Aftertreatment system
CI	Compression ignition
CNG	Compressed natural gas
GTL	Gas-to-liquid
CO	Carbon monoxide
CO ₂	Carbon dioxide
DOC	Diesel oxidation catalyst
DPF	Diesel particulate filter
EGR	Exhaust gas recirculation
EPA	Environmental Protection Agency
EU	European Union
FAME	Fatty-acid methyl ester
GDI	Gasoline direct injection
GHG	Greenhouse gas
GPF	Gasoline particulate filter

HC	Hydrocarbons
HCCI	Homogenous charge compression ignition
ICCT	International Council on Clean Transportation
LNT	Lean NO _x trap
NEDC	New European Driving Cycle
NH ₃	Ammonia
NO _x	Oxides of nitrogen
PGM	Platinum group metals
PM	Particulate matter
PMP	UN-ECE Particulate matter programme
PN	Particle number
POC	Particulate oxidation catalyst
SCR	Selective catalytic reduction
SI	Spark ignition
UN-ECE	United Nations Economic Commission for Europe
WLTC	World Harmonised Light Duty Vehicle Test Cycle
WLTP	World Harmonised Light Duty Vehicle Test Procedure

Piotr Bielaczyc, DEng. – head of the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Dr inż. Piotr Bielaczyc – kierownik Zakładu Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.

e-mail: piotr.bielaczyc@bosmal.com.pl



Joseph Woodburn, MSc. – researcher at the Engine Research Department, BOSMAL Automotive Research and Development Institute Ltd in Bielsko-Biala.

Mgr inż. Joseph Woodburn – inżynier ds. badań w Zakładzie Badań Silników, Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o., Bielsko-Biala.



Books on combustion engines

Książki o silnikach spalinowych

EMISJA ZANIECZYSZCZEŃ MOTORYZACYJNYCH W ŚWIELE NOWYCH PRZEPISÓW UNII EUROPEJSKIEJ

Jerzy MERKISZ, Jacek PIELECHA,
Stanisław RADZIMIRSKI

Wydawnictwo WKL, Warszawa 2012

Opis obowiązujących przepisów Unii Europejskiej, dotyczących emisji zanieczyszczeń przez pojazdy samochodowe, które znacznie zmieniono w latach 2006-2011. Wyjaśniono strukturę i zakres obowiązywania przepisów, zasady homologacji typu pojazdów lekkich oraz możliwości rozszerzenia homologacji, jak również zasady homologacji typu pojazdów ciężkich. W rozważaniach uwzględniono też samochody o napędzie alternatywnym. Przedstawiono także najważniejsze zagadnienia z zakresu kontroli zgodności produkcji i w eksploatacji oraz pomiary toksyczności spalin w rzeczywistych warunkach ruchu i porównano ich wyniki z toksycznością badaną w warunkach hamownianych. Podano wyniki testów badawczych nie tylko lekkich i ciężkich pojazdów drogowych, lecz także pojazdów pozadrogowych (np. ciągników rolniczych, maszyn do robót ziemnych i leśnych, pojazdów szynowych i pojazdów specjalnego przeznaczenia).



AUTOMOTIVE EXHAUST EMISSIONS IN THE NEW EU LEGISLATION

Jerzy MERKISZ, Jacek PIELECHA,
Stanisław RADZIMIRSKI

Publishing House: WKL, Warsaw 2012

The study presents the description of the applicable European Union regulations related to the automotive exhaust emissions that were considerably modified in the years 2006-2011. The structure and scope of the regulations have been explained; the principles of light duty vehicles type approval and its extension have been discussed along with the type approval of heavy-duty vehicles. In the study also alternative powertrains have been included. The major issues in the production and operation conformity have been discussed along with exhaust emissions measured under real traffic conditions; the results have been compared to the exhaust emission in the laboratory conditions. Besides, the results of the tests have been presented, as performed not only on light and heavy duty but also non-road vehicles (farm tractors, groundwork and forest machinery, railroad vehicles and special vehicles).



3RD INTERNATIONAL EXHAUST EMISSIONS SYMPOSIUM

ISBN 978-83-931383-2-6

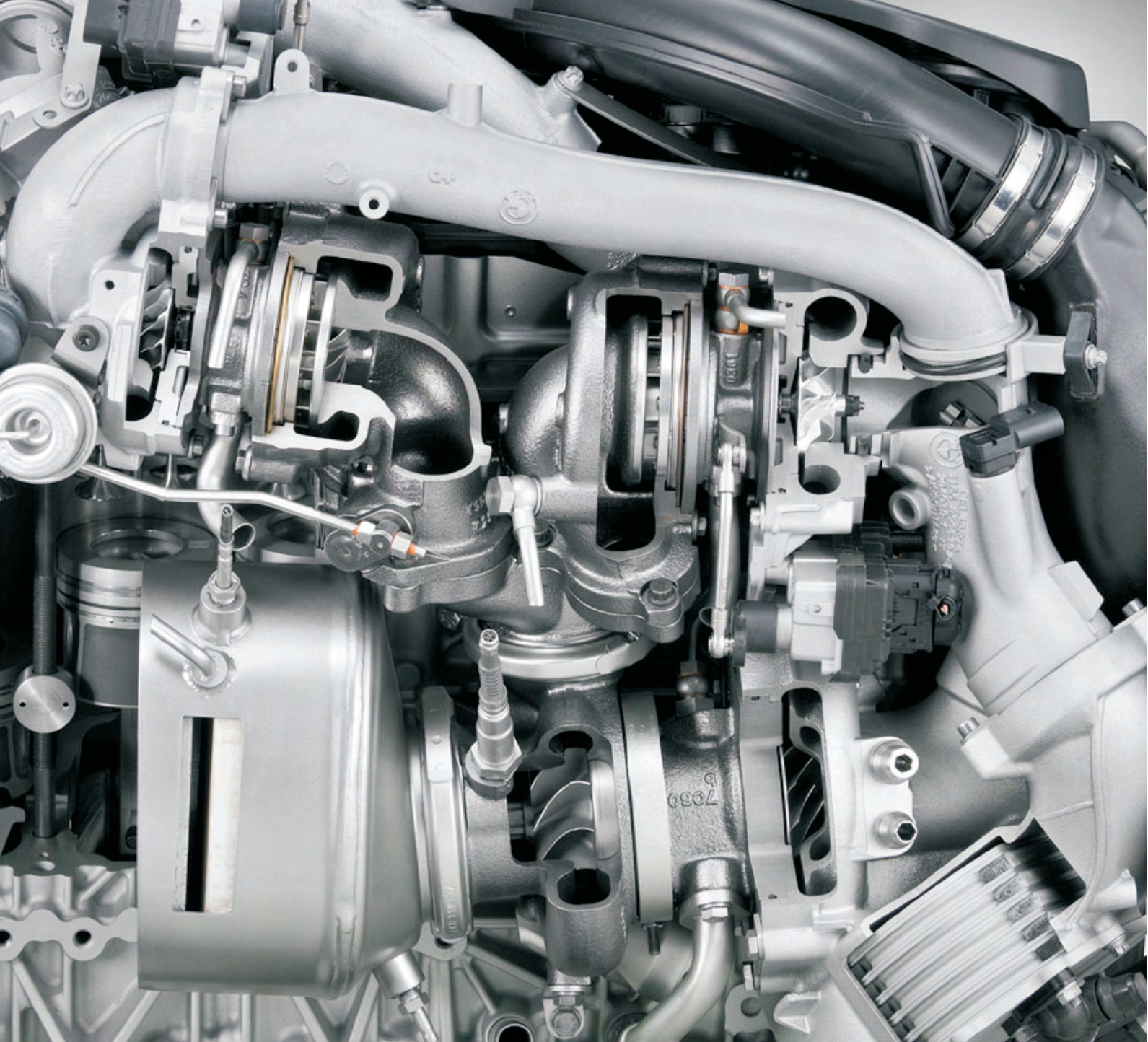
Current and future trends in automotive emissions, fuels, lubricants and test methods - 2012



40th anniversary
BOSMAL
AUTOMOTIVE RESEARCH & DEVELOPMENT INSTITUTE LTD

SYMPOSIUM PROCEEDINGS
BOSMAL
Automotive Research & Development Institute Ltd

24-25 May 2012
Bielsko-Biala, POLAND



Wydawca:

Polskie
Towarzystwo
Naukowe
Silników
Spalinowych

ISSN: 0138-0346



Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych

Polish Scientific Society of Combustion Engines

O Towarzystwie

Cele
Statut
Regiony

Władze

Zarząd
Komisja Rewizyjna

Członkowie

Założyciele
Honorowi
Zwyczajni
Wspierający

Kontakt

Kontakt

Członkostwo

Wniosek

Z życia PTNSS

Zebrań Zarządu
Zebrań Członków
Inicjatywy
Komunikaty

Konferencje

Konferencje PTNSS
Konferencje inne
Konferencje opisy

Kontakt

Prenumerata

Skład-osobowy

Koncepcja wyd.

Współpraca

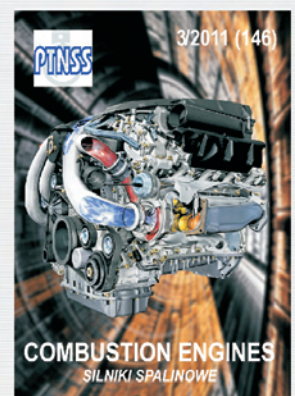
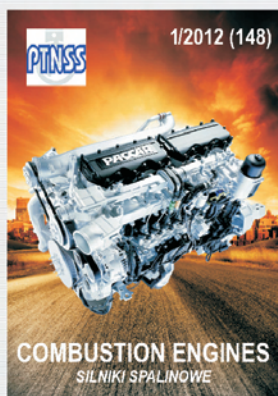
Zgłoszenia

Zapowiedź

Bieżący numer

Archiwum

Pod każdą ze stron tytułowych jest link do spisu artykułów.



www.ptnss.pl