

Paweł FUĆ¹, Piotr LIJEWSKI¹, Barbara SOKOLNICKA¹,
 Natalia SZYMLET¹, Maciej SIEDLECKI¹, Tomasz DĘBOWSKI²

¹Poznan University of Technology (Politechnika Poznańska)

²Lindo Catsystem Sp. z o.o.

IMPACT OF USING A FILTER IN A DIRECT GASOLINE INJECTION ENGINE EXHAUST SYSTEM ON THE EMITTED PARTICLE MASS AND NUMBER

Wpływ zastosowania filtra w układzie wylotowym silnika z bezpośrednim wtryskiem benzyny na masę i liczbę emitowanych cząstek stałych

Abstract: The article presents emission test results comparison carried out on a dynamic engine dynamometer. Parameters were recorded during a drive made in accordance with the requirements of the RDE. Test bench allowed to determine the particle mass and number emission in the repetitive engine operation conditions. One of three used elements was an OEM solution from one of particulate filters producers, the other was intended for use in original systems, the third was a custom product. The highest efficiency of particulate filtration was demonstrated by the last filter, which was adapted to the engine.

Keywords: GPF, particle mass, particle number, GDI engine

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie wyników badań przeprowadzonych na dynamicznej hamowni silnikowej. Parametry zarejestrowano podczas przejazdu zgodnego z wymaganiami procedury RDE (Real Driving Emissions). Wykorzystanie stanowiska badawczego umożliwiło określenie emisji masy i liczby cząstek stałych w powtarzalnych warunkach eksploatacji. Do badań wykorzystano trzy elementy, z czego jeden stanowił rozwiązanie OEM, drugi również przeznaczony był do wykorzystania w oryginalnych układach, trzeci stanowił produkt własny. Największą skuteczność filtracji wykazał filtr ostatni, który dostosowany został do specyfiki i warunków pracy silnika.

Słowa kluczowe: GPF, cząstki stałe, liczba cząstek stałych, bezpośredni wtrysk benzyny

1. Introduction

As a result of the constant tightening of the regulations on mass emissions and particle numbers for passenger cars, it is necessary to equip vehicles with elements of the exhaust gas aftertreatment system responsible for their filtration [12]. In order to find the most effective solution and fit the element to the outlet system of a particular vehicle, research in this area should be carried out continuously. One of the main differences is the filtration efficiency, which is influenced by the composition of the exhaust gases of both engine types. The compression-ignition engine produces a soot cake, which increases the filtration efficiency by up to 90%, while in the gasoline engine filter it remains at 70-80% [6]. Current diesel particulate filters are modeled on their counterparts used in compression-ignition engines since the 1980s [2]. Due to the different specificity of the particle dimensional distribution emitted from a spark-ignition engine, it is necessary to introduce structural changes in a given element of the exhaust system [5, 7]. The popularity of engines powered by direct gasoline injection on the world market leads to an increasing emission of nanoparticles into the atmosphere. They pose a significant threat to human health when their diameters do not exceed 100 nm [13]. Particles with small diameters are impossible to remove from the body and cause permanent lung damage [1, 4, 8]. The introduction of EURO 6 emission standards in Europe limiting the number of emitted particles confirms the necessity to research and develop available solutions. The advantage of using particulate filters in spark-ignition engines is that there is no need to develop a regeneration strategy due to the increased oxygen concentration in the exhaust. The issue of diesel particulate filters is a standard topic among diesel engine manufacturers, while in the case of gasoline engines it is still an area where research should strive to find the most effective solution.

2. Research methodology

The tests were carried out on a dynamic engine dynamometer equipped with an engine homologated according to the EURO 5 norm, with a displacement volume of 1197 cm³ (tab. 1). The test cycle reconstructed with the use of a dynamometer was recorded during a drive in real traffic conditions with a vehicle of the same technical parameters as the tested engine [11]. The RDE test procedure was introduced in September 2017, in addition to the WLTP (World Light-Duty Vehicle Test Procedure). It allows to determine the real content of toxic and harmful compounds in exhaust gases, which is increased compared to tests in laboratory conditions. During the actual drive, external factors such as congestion, atmospheric conditions and the influence of the driving style are taken under consideration [3].

Table 1

Technical data of the tested engine

Ignition type	spark-ignition
Injection type	direct
Displacement [cm ³]	1197
Cylinders number	4
Power [kW]	77
Maximum torque [Nm]	160

The tested engine was located on the dynamic brake station of the AUTOMEX company (fig. 1). The dynamometer of this type is characterized by a short time of overdrive (load changes), which makes it possible to reproduce the previously recorded cycle, as well as the mapping of engine braking, where the engine is driven by the electric motor [9].

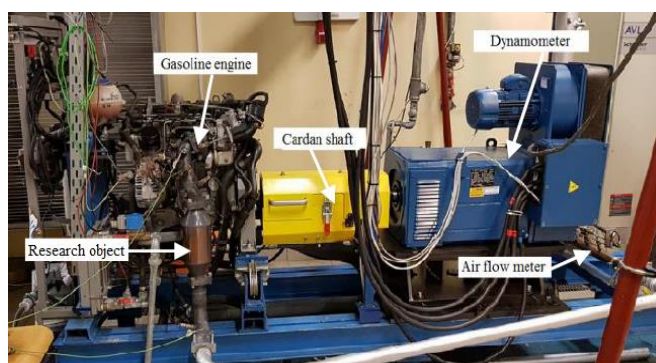


Fig. 1. View of the engine on the brake station

3. Measuring apparatus

The equipment from the PEMS (Portable Emissions Measurement System) group was used for the tests, which contains analyzers for the measurement of harmful compounds such as: carbon dioxide, carbon monoxide, hydrocarbons, particulates in the mass range (PM) and the number (PN). The apparatus was calibrated with reference gases in accordance with the procedure supplied by the manufacturer [10]. The mass measurement of particulates was made possible by the AVL mobile analyzer MSS (Micro Soot Sensor), (fig. 2a). The device determines particulates mass concentration and makes it possible to

calculate the emissions in relation to the traveled distance. The Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS™) 3090 uses a 5.6 to 560 nm particle emission distribution for the engine. It enables visualization and testing of dynamic changes of particulate emissions (fig. 2b). Information on exhaust gas flow values was obtained using the SEMTECH DS analyzer (fig. 2c).

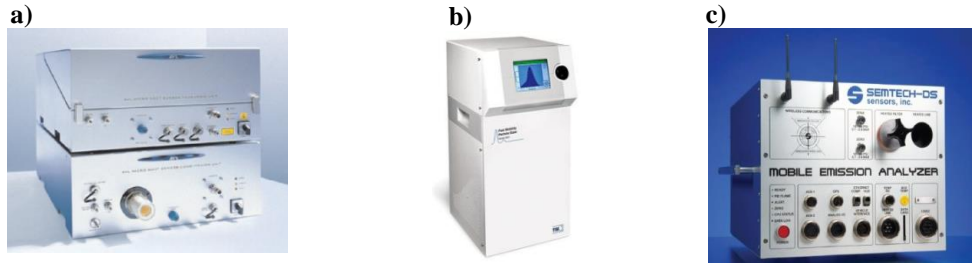


Fig. 2. Testing devices: soot concentration - AVL MSS (a), SEMTECH DS analyzer (b), number and dimensional distribution - EEPS TSI 3090 (c)

4. Research objects

The first filter was equipped with a ceramic carrier (fig. 3a). This type of carrier heats up much slower than a metal one, therefore it achieves the appropriate operating temperature (Light-off) after a longer operating time of the engine, which reduces its effectiveness when used over shorter distances. The tested filter is the original solution of one of the passenger car manufacturers and is used in newly produced cars. Another tested solution was also a filter which was a serial product, but differed in the material from which it was made (fig. 3b). The most important parameter describing the metal carrier is the cells number, which was 200 CPSI (Cell Per Square Inch). For the last filter made as part of the project, this value was 400 CPSI (fig. 3c). This parameter is directly related to the filtration efficiency.

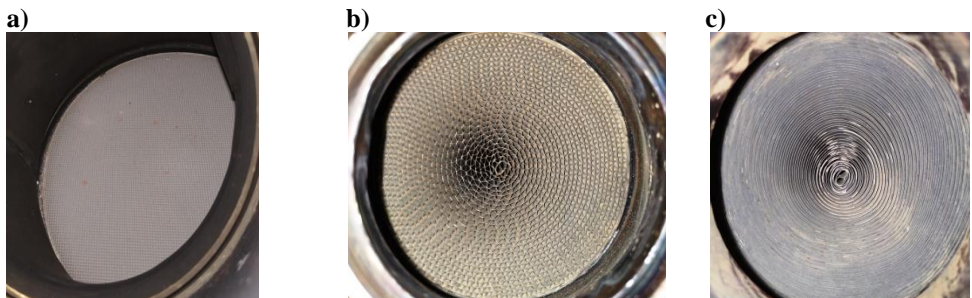


Fig. 3. The inlet of the ceramic filter carrier No. 1 (a), the inlet of the metal filter carrier No. 2 (b), the inlet of the metal filter carrier No. 3 (c)

5. Test results

The primary task of the particulate filter is to limit particle presence in the exhaust gases. In the case of an engine with direct gasoline injection, this objective is specified in terms of reducing particle emissions with small diameters, which is one of the main problems associated with this type of engines [6]. In the case of the first filter, there was a limitation of particles with diameters above 22.1 nm, while particles with smaller diameters appeared in large numbers, which presents their dimensional distribution (fig. 4a). The large number of solid particles with small diameters is not the same as their mass, because in the case of filter 1, its reduction was the highest of all filters (tab. 2).

Table 2

Comparison of test results of individual filters

	Filter 1	Filter 2	Filter 3
PN [# / km]	2,58E+11	2,48E+11	1,56E+11
PM [mg / km]	0,000057	0,000174	0,000107

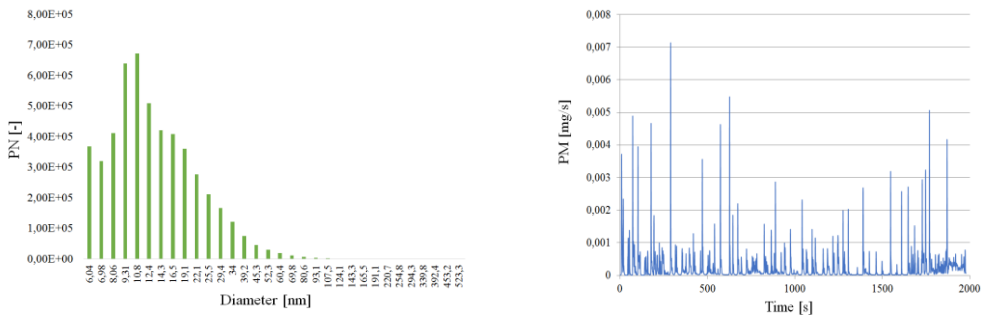


Fig. 4. Results for filter No. 1: particles dimensional distribution (a), emission of particles mass per second (b)

The filtration characteristics of the second of the tested filters caused a change in the character of the particles number dimensional distribution. The highest value was recorded for the smallest diameter of the measuring device channel, which indicates the highest number of particles most dangerous for humans (fig. 5a). Despite the decrease in the particulates mass emission compared to other solutions, this filter did not bring the best results after considering all the criteria (tab. 2).

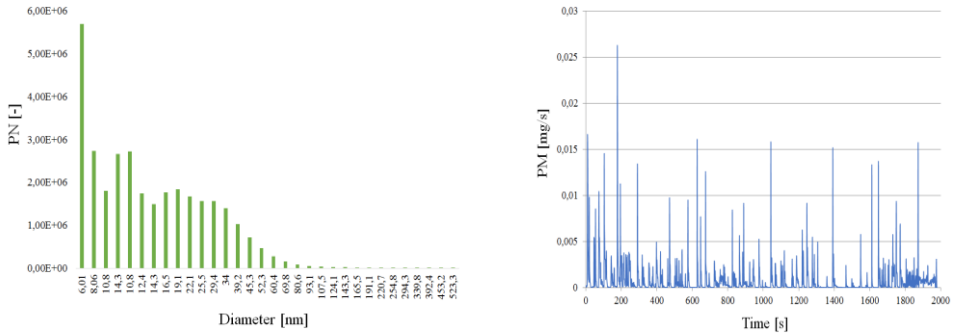


Fig. 5. Results for filter No. 2: particles dimensional distribution (a), emission of particles mass per second (b)

The solution that is a compromise between the character of the dimensional distribution of the solid particles number and the emission of their mass per second is filter 3. Dimensional distribution is close to the normal distribution, which is a situation typical for compression-ignition engines, in which the problem associated with nanoparticles has a much lower weight [3] (fig. 6).

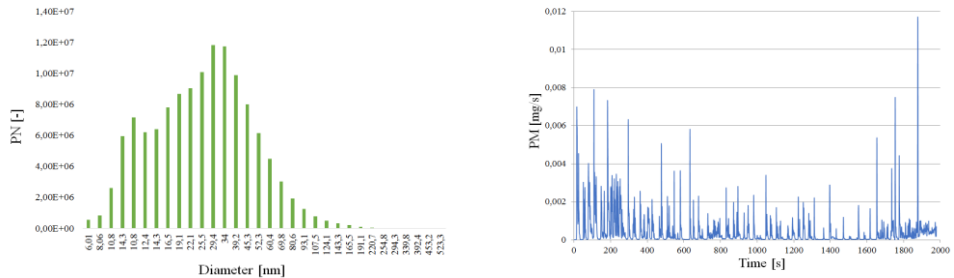


Fig. 6. Results for filter No. 2: particles dimensional distribution (a), emission of particles mass per second (b)

A graphical representation of the mass and particle number emission comparison results confirms that filter 3 is a solution that combines the need to reduce particulate emissions in both these aspects. The first filter, despite the smallest mass of emitted particles, is the worst solution in terms of their number (fig. 7).

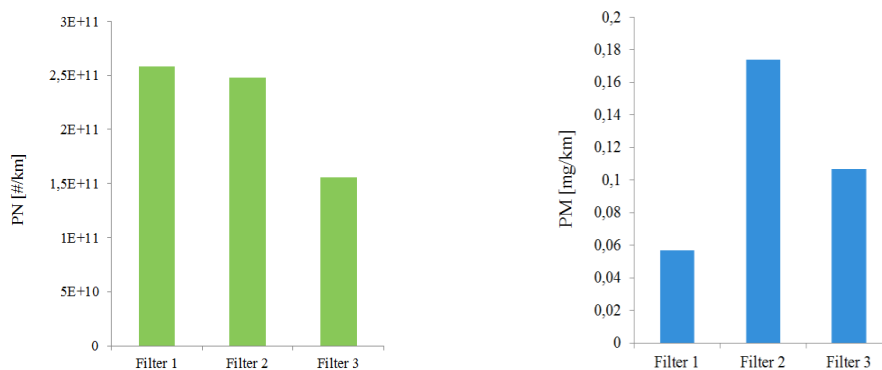


Fig. 7. Results comparison: particles number (a), particles mass (b)

6. Summary

Serially produced particulate filters are most often modeled on structural solutions adapted to units powered by diesel oil. The test results confirm that adjusting the filter construction and taking into account its operating conditions increases the filtration efficiency. When considering the results for the particulates mass and number, the choice of the most effective solution would be different, but the concept of particulate emissions should be seen as a combination of two aspects. Increasing the number of cells and the use of the design developed as part of the project, which is in the process of being filed to the patent office, has resulted in a reduction in the number of particulates compared to OEM solutions. This confirms the necessity and validity of the conducted research aimed at improving solutions to meet current and future standards for mass emissions and particle numbers.

Acknowledgement

The research was funded by project co-financed by the European Regional Development Fund in the Regional Program - Lubuskie 2020 (RPLB.01.01.00-08-0055/16-00).

7. References

1. Aikawa K., Jetter J.J.: Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine. Applicability of the particulate matter index. *Int. J. Engine Res.*, 15, 2013.
2. Dittler A.: *The Application of Diesel Particle Filters - From Past to Present and Beyond.* Springer Science+Business Media, New York 2016.

3. Fuc P., Rymaniak L., Ziolkowski A.: The correlation of distribution of PM number emitted under actual conditions of operation by PC and HDV vehicles. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 174, 2014.
4. Gatti A.M., Montanari S.: *Nanopathology. The health impact of nanoparticles*. Taylor & Francis Group, LLC 2008.
5. Karavalakis G., Durbin T.D., Yang J., Ventura L., Xu K.: *Fuel Effects on PM Emissions from Different Vehicle/Engine Configurations: A Literature Review*; SAE Technical Paper; SAE International: Warrendale, PA, USA 2018.
6. Lambert C., Chanko T., Dobson D., Liu X., Pakko J.: *Gasoline Particle Filter Development. Emission Control Science and Technology –Vol. 3, Iss. 1, 2017*.
7. Leach F., Stone R., Richardson D., Lewis A., Akehurst S., Turner J., Remmert S., Campbell R., Cracknell R.: *Particulate emissions from a highly boosted GDI engine. Int. J. Engine Res.* 2017.
8. Liang B., Ge Y., Tan J., Han X., Gao L., Hao L., Ye W., Dai P.: *Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: Gasoline and M15 methanol gasoline. J. Aerosol. Sci., 57, 2013*.
9. Merkisz J., Fuc P., Lijewski P. et al.: *The analysis of exhaust gas thermal energy recovery through a TEG generator in city traffic conditions reproduced on a dynamic engine test bed. Journal of electronic materials, Vol. 44, 2015*.
10. Merkisz J., Lijewski P., Fuc P. et al.: *Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers, Maintenance and reliability, Vol. 15, 2013*.
11. Merkisz J., Pielecha J., Lijewski P. et al.: *Exhaust emissions from vehicles in real traffic conditions in the Poznan agglomeration. WIT Transactions on Ecology and the Environment, Vol. 174, 2013*.
12. Mohsin R., Longfei C., Felix L., Shiting D.: *A Review of Particulate Number (PN) Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Engines and Their Control Techniques*. Published by MDPI AG, Basel, Switzerland, 2018.
13. Muñoz M., Haag R., Honegger P., Zeyer K., Mohn J., Comte P., Czerwinski J., Heeb N.: *Co-formation and co-release of genotoxic PAHs, alkyl-PAHs and soot nanoparticles from gasoline direct injection vehicles, Atmospheric Environment 178, 2018*.

WPLYW ZASTOSOWANIA FILTRA W UKŁADZIE WYLOTOWYM SILNIKA Z BEZPOŚREDNIM WTRYSKIEM BENZYNY NA MASĘ I LICZBĘ EMITOWANYCH CZĄSTEK STAŁYCH

1. Wprowadzenie

W wyniku stałego zaostrzania przepisów dotyczących emisji masy i liczby cząstek stałych dla samochodów osobowych, konieczne jest wyposażanie pojazdów w elementy układu oczyszczania gazów wylotowych odpowiedzialnych za ich filtrację [12]. W celu znalezienia najbardziej skutecznego rozwiązania oraz dopasowania elementu do układu wylotowego konkretnego pojazdu należy stale prowadzić badania w tym obszarze. Jedną z podstawowych różnic jest wydajność filtracji, na którą wpływ ma skład gazów wylotowych. W silniku o zapłonie samoczynnym powstaje skorupa z sadzy, która powoduje zwiększenie skuteczności filtracji do 90%, podczas gdy w filtrze silnika benzynowego pozostanie ona na poziomie 70–80% [6]. Obecne filtry cząstek stałych do silników zasilanych benzyną wzorowane są na ich odpowiednikach stosowanych w silnikach o zapłonie samoczynnym od lat 80. ubiegłego wieku [2]. Ze względu na odmienną specyfikę rozkładu wymiarowego cząstek stałych emitowanych z silnika o zapłonie iskrowym, konieczne jest wprowadzenie zmian konstrukcyjnych w danym elemencie układu wylotowego [5, 7]. Popularność silników zasilanych bezpośrednim wtryskiem benzyny na rynku światowym prowadzi do zwiększającej się emisji nanocząstek do atmosfery. Stanowią one szczególne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego, z uwagi na średnice, które nie przekraczają 100 nm [13]. Cząstki o małych średnicach są niemożliwe do usunięcia z organizmu i powodują trwałe uszkodzenia płuc [1, 4, 8]. Wprowadzenie w Europie normy emisji spalin EURO 6, ograniczającej liczbę emitowanych cząstek potwierdza konieczność badania i rozwijania dostępnych rozwiązań. Zaletą wykorzystania filtrów cząstek stałych w silnikach o zapłonie iskrowym jest brak konieczności opracowania strategii ich regeneracji, z uwagi na zwiększone stężenie tlenu w spalinach. Zagadnienie dotyczące filtrów cząstek stałych jest standardowym tematem wśród producentów silników o zapłonie samoczynnym, natomiast w przypadku silników benzynowych wciąż stanowi obszar, w którym poprzez badania należy dążyć do znalezienia najskuteczniejszego rozwiązania.

2. Metodyka badań

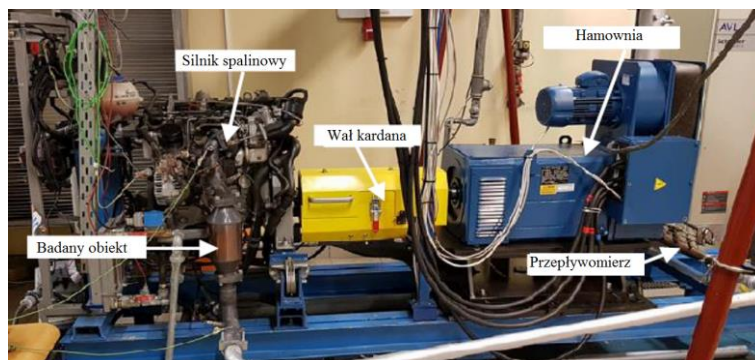
Badania przeprowadzono na dynamicznej hamowni silnikowej, wyposażonej w silnik homologowany według normy EURO 5, o objętości skokowej 1197 cm³ (tab. 1). Cykl badawczy odtworzony za pomocą hamowni zarejestrowany został podczas przejazdu w rzeczywistych warunkach ruchu pojazdem o takich samych parametrach technicznych [11]. Procedurę badań RDE wprowadzono we wrześniu 2017 r. jako uzupełnienie testu homologacyjnego WLTP. Umożliwia ona określenie rzeczywistej zawartości związków toksycznych i szkodliwych w gazach wylotowych, która ulega zwiększeniu w porównaniu do badań w warunkach laboratoryjnych. Podczas rzeczywistego przejazdu uwzględnione zostają czynniki zewnętrzne, takie jak kongestia, warunki atmosferyczne oraz wpływ stylu jazdy kierowcy [3].

Tabela 1

Dane techniczne badanego silnika

Rodzaj silnika	zapłon iskrowy
Objętość skokowa [cm ³]	1197
Liczba cylindrów	4
Układ cylindrów	rzędowy
Moc [kW]	77
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	160
Typ wtrysku	bezpośredni

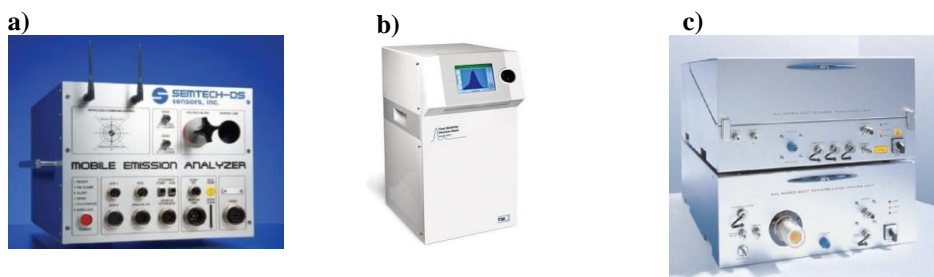
Badany silnik znajdował się na dynamicznym stanowisku hamulcowym firmy AUTOMEX (rys. 1). Hamownia taka charakteryzuje się bardzo krótkim czasem przesterowania (zmiany obciążenia), przez co możliwe jest odtworzenie wcześniej zarejestrowanego cyklu, a także odwzorowanie hamowania silnikiem, gdzie silnik napędzany jest przez silnik elektryczny [9].



Rys. 1. Widok silnika na stanowisku

3. Aparatura pomiarowa

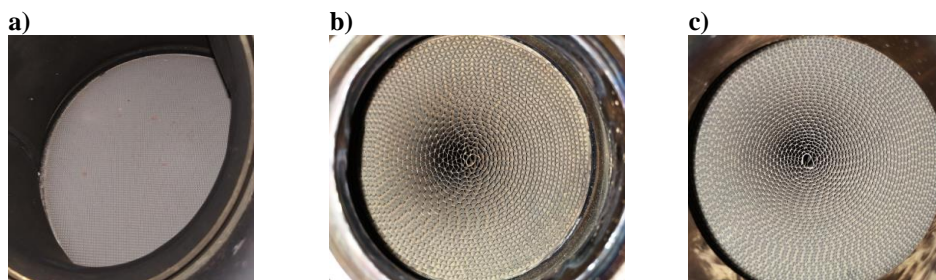
Do badań wykorzystano aparaturę z grupy PEMS, która zawiera analizatory do pomiaru szkodliwych związków takich jak: dwutlenku węgla, tlenku węgla, węglowodorów, cząstek stałych w zakresie masy (PM) i liczby (PN). Aparatura została skalibrowana gazami wzorcowymi zgodnie z procedurą dostarczaną przez producenta [10]. Pomiar masy cząstek stałych umożliwił mobilny analizator MSS (Micro Soot Sensor) firmy AVL (rys. 2c). Urządzenie określa stężenie masy cząstek stałych i umożliwia obliczenie emisji w odniesieniu do pokonanego dystansu. Spektrometr Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS™) 3090 mierzy rozkład wielkości emisji cząstek stałych silnika od 5,6 do 560 nm przy najwyższej dostępnej rozdzielczości (10 Hz). Umożliwia wizualizację i badanie dynamicznych zmian emisji cząstek stałych (rys. 2b). Informacje dotyczące wartości przepływu gazów wylotowych uzyskano za pomocą analizatora SEMTECH DS (rys. 2a).



Rys. 2. Urządzenia wykorzystane do pomiaru liczby i rozkładu wymiarowego cząstek stałych - EEPS TSI 3090 (a), SEMTECH DS (b), stężen - AVL MSS (c)

4. Obiekty badań

Filtr pierwszy wyposażony został w nośnik ceramiczny, zapewniający przepływ gazów wylotowych między jego ściankami (rys. 3a). Metoda ta poprawia skuteczność filtracji poprzez rozprowadzenie spalin wewnątrz filtra. Nośnik ceramiczny nagrzewa się dużo wolniej niż nośnik metalowy, dlatego osiąga odpowiednią temperaturę pracy (Light-off) po dłuższej pracy silnika, co zmniejsza jego skuteczność w przypadku użytkowania na krótszych dystansach. Badany filtr stanowi rozwiązanie oryginalne jednego z producentów pojazdów osobowych i stosowany jest seryjnie w nowo produkowanych samochodach. Kolejnym badanym rozwiązaniem był również filtr stanowiący produkt seryjnie stosowany, ale różnił się materiałem, z którego go wykonano (rys. 3b). Najważniejszym parametrem opisującym metalowy nośnik jest liczba komórek, która wynosiła 200 CPSI (Cell Per Square Inch). W przypadku ostatniego filtra, wykonanego na potrzeby projektu, wartość ta wynosiła 400 CPSI (rys. 3c). Parametr ten jest bezpośrednio związany ze skutecznością filtracji.



Rys. 3. Wlot nośnika ceramicznego filtra nr 1 (a), wlot nośnika metalowego filtra nr 2 (b), wlot nośnika metalowego filtra nr 3 (c)

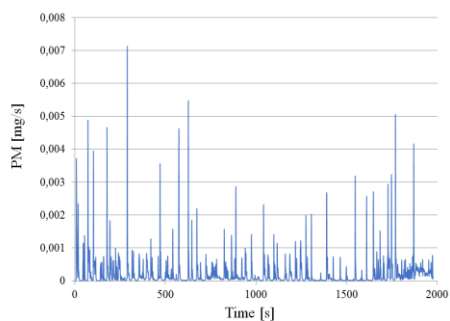
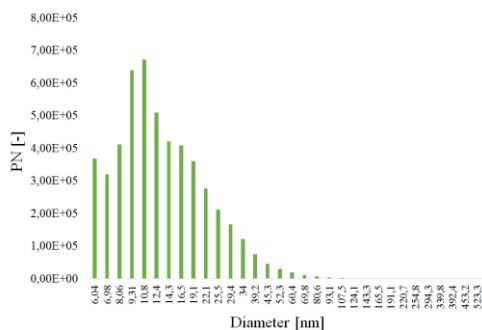
5. Wyniki badań

Podstawowym zadaniem filtra cząstek stałych jest ograniczenie ich występowania w gazach wylotowych. W przypadku silnika z bezpośrednim wtryskiem benzyny, cel ten sprecyzowany jest pod kątem zmniejszania emisji cząstek o małych średnicach, stanowiący jeden z głównych problemów związanych z tym rodzajem silników. W przypadku pierwszego filtra nastąpiło ograniczenie cząstek o średnicach powyżej 22,1 nm, natomiast cząstki o mniejszych średnicach występują licznie, co przedstawia ich rozkład wymiarowy (rys. 4a). Duża liczba cząstek stałych o małych średnicach nie jest tożsama ze stężeniem ich masy, ponieważ w przypadku filtra nr 1 jej ograniczenie wyniosło najwięcej ze wszystkich filtrów (tab. 2).

Tabela 2

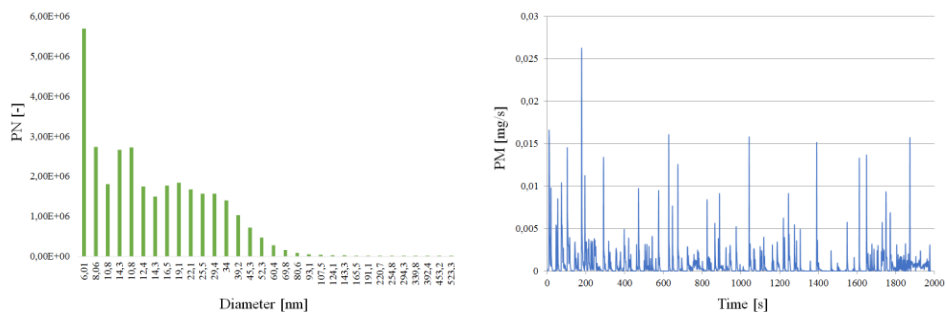
Porównanie wyników badań poszczególnych filtrów

	Filtr 1	Filtr 2	Filtr 3
PN [# /km]	2,58E+11	2,48E+11	1,56E+11
PM [mg/km]	0,000057	0,000174	0,000107



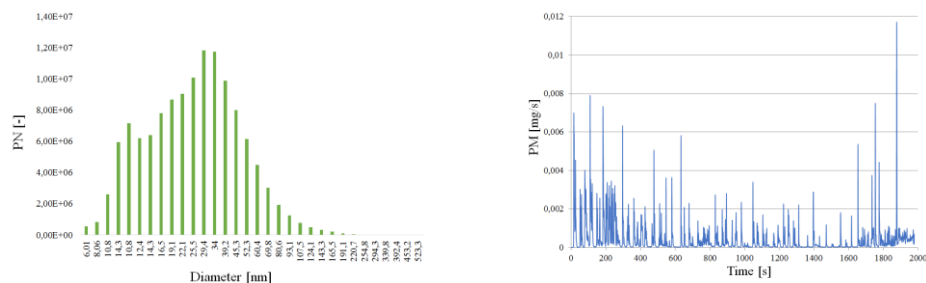
Rys. 4. Graficzna interpretacja wyników dla filtra nr 1: rozkład wymiarowy cząstek stałych (a), sekundowa emisja masy cząstek stałych (b)

Drugi z badanych filtrów spowodował zmianę charakteru rozkładu wymiarowego liczby cząstek stałych. Największą wartość zarejestrowano dla najmniejszej średnicy kanału urządzenia pomiarowego, co świadczy o największej liczbie najbardziej niebezpiecznych dla człowieka cząstek (rys. 5a). Pomimo zmniejszenia wartości emisji masy cząstek stałych w porównaniu do pozostałych rozwiązań, filtr ten nie przyniósł najlepszych rezultatów po rozważeniu wszystkich kryteriów (tab. 2).



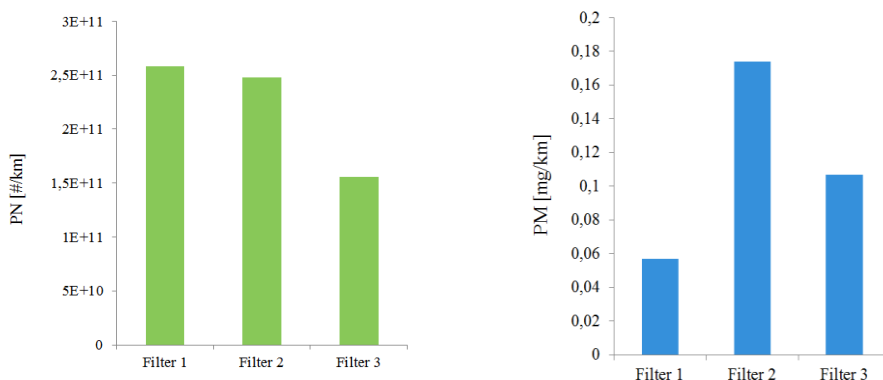
Rys. 5. Graficzna interpretacja wyników dla filtra nr 2: a) rozkład wymiarowy cząstek stałych, b) sekundowa emisja masy cząstek stałych

Rozwiązaniem stanowiącym kompromis pomiędzy charakterem rozkładu wymiarowego liczby cząstek stałych oraz emisją ich masy w czasie jest filtr nr 3. Rozkład wymiarowy zbliżony jest do rozkładu normalnego, stanowiącego sytuację typową dla silników o zapłonie samoczynnym, w których problematyka związana z nanocząstkami ma znacznie mniejszą wagę (rys. 6).



Rys. 6. Graficzna interpretacja wyników dla filtra nr 3: rozkład wymiarowy cząstek stałych (a), sekundowa emisja masy cząstek stałych (b)

Graficzne przedstawienie porównania wyników emisji masy i liczby cząstek potwierdza, że filtr nr 3 stanowi rozwiązanie łączące potrzebę ograniczenia emisji cząstek stałych w obu tych aspektach. Filtr pierwszy, pomimo najmniejszej masy emitowanych cząstek, stanowi najgorsze rozwiązanie w aspekcie ich liczby (rys. 7).



Rys. 7. Graficzne porównanie uzyskanych wyników: liczba cząstek stałych (a), masa cząstek stałych (b)

6. Podsumowanie

Filtry cząstek stałych produkowane seryjnie najczęściej wzorowane są na rozwiązaniach konstrukcyjnych dostosowanych do jednostek zasilanych olejem napędowym. Wyniki badań potwierdzają, że dostosowanie konstrukcji filtra oraz uwzględnienie warunków jego pracy powoduje zwiększenie skuteczności filtracji. W momencie rozpatrywania wyników osobno dla masy i liczby cząstek stałych wybór rozwiązania najskuteczniejszego byłby inny, lecz pojęcie emisji cząstek stałych należy traktować jako połączenie dwóch aspektów. Zwiększenie liczby cel oraz zastosowanie konstrukcji opracowanej na potrzeby projektu spowodowało zmniejszenie liczby cząstek stałych w porównaniu do rozwiązań OEM. Potwierdza to zasadność i konieczność prowadzonych badań, mających na celu udoskonalanie rozwiązań w celu spełnienia obowiązujących oraz przyszłych norm emisji masy i liczby cząstek stałych.

Podziękowanie

Badania zostały sfinansowane z projektu współfinansowanego przez Regionalny Program Operacyjny – Lubuskie 2020 (RPLB.01.01.00-08-0055/16-00).

7. Literatura

1. Aikawa K., Jetter J.J.: Impact of gasoline composition on particulate matter emissions from a direct-injection gasoline engine. Applicability of the particulate matter index. *Int. J. Engine Res.*, 15, 2013,
2. Dittler A.: *The Application of Diesel Particle Filters - From Past to Present and Beyond.* Springer Science+Business Media, New York 2016.
3. Fuc P., Rymaniak L., Ziolkowski A.: The correlation of distribution of PM number emitted under actual conditions of operation by PC and HDV vehicles. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 174, 2014.
4. Gatti A.M., Montanari S.: *Nanopathology. The health impact of nanoparticles.* Taylor & Francis Group, LLC 2008.
5. Karavalakis G., Durbin T.D., Yang J., Ventura L., Xu K.: *Fuel Effects on PM Emissions from Different Vehicle/Engine Configurations: A Literature Review; SAE Technical Paper; SAE International: Warrendale, PA, USA 2018.*
6. Lambert C., Chanko T., Dobson D., Liu X., Pakko J.: *Gasoline Particle Filter Development. Emission Control Science and Technology –Vol. 3, Iss. 1, 2017.*
7. Leach F., Stone R., Richardson D., Lewis A., Akehurst S., Turner J., Rimmert S., Campbell R., Cracknell R.: *Particulate emissions from a highly boosted GDI engine. Int. J. Engine Res.* 2017.
8. Liang B., Ge Y., Tan J., Han X., Gao L., Hao L., Ye W., Dai P.: *Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: Gasoline and M15 methanol gasoline. J. Aerosol. Sci.*, 57, 2013.
9. Merksiz J., Fuc P., Lijewski P. et al.: *The analysis of exhaust gas thermal energy recovery through a TEG generator in city traffic conditions reproduced on a dynamic engine test bed. Journal of electronic materials*, Vol. 44, 2015.
10. Merksiz J., Lijewski P., Fuc P. et al.: *Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers, Maintenance and reliability*, Vol. 15, 2013.
11. Merksiz J., Pielecha J., Lijewski P. et al.: *Exhaust emissions from vehicles in real traffic conditions in the Poznan agglomeration. WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 174, 2013.
12. Mohsin R., Longfei C., Felix L., Shiting D.: *A Review of Particulate Number (PN) Emissions from Gasoline Direct Injection (GDI) Engines and Their Control Techniques.* Published by MDPI AG, Basel, Switzerland, 2018.
13. Muñoz M., Haag R., Honegger P., Zeyer K., Mohn J., Comte P., Czerwinski J., Heeb N.: *Co-formation and co-release of genotoxic PAHs, alkyl-PAHs and soot nanoparticles from gasoline direct injection vehicles, Atmospheric Environment* 178, 2018.