

Paweł FUĆ, Maciej SIEDLECKI, Natalia SZYMLET,
Barbara SOKOLNICKA, Łukasz RYMANIAK, Michał DOBRZYŃSKI
Poznan University of Technology (Politechnika Poznańska)

EXHAUST EMISSIONS FROM A EURO 6C COMPLIANT PC VEHICLE IN REAL OPERATING CONDITIONS

Emisja składników toksycznych spalin w rzeczywistych warunkach eksploatacji z silnika pojazdu spełniającego normę homologacyjną EURO 6c

Abstract: *The current EURO 6c standard has introduced a limit on the number of solid particles for spark ignition engines equal to that for compression ignition engines (6×10^{11}). To meet the requirements, manufacturers install particulate filters in the exhaust systems of most new engines. The article presents the results of vehicle testing with this solution during the drive carried out in accordance with the RDE procedure. The measurement results, after taking into account the Conformity Factor in relation to the approval limits, confirmed the efficiency of aftertreatment system in terms of both gas and solid components.*

Keywords: emissions, RDE, EURO limits, GPF, Particulate Matter

Streszczenie: *Obecna norma EURO 6c wprowadziła limit liczby cząstek stałych dla silników z zapłonem iskrowym równy temu dla silników z zapłonem samoczynnym (6×10^{11}). By spełnić wymagania, producenci instalują filtry cząstek stałych w układach wylotowych większości nowych silników. W artykule przedstawiono wyniki badań pojazdu z tym rozwiązaniem podczas przejazdu przeprowadzonego zgodnie z procedurą RDE. Wyniki pomiarów po uwzględnieniu współczynnika Conformity Factor w stosunku do limitów homologacyjnych potwierdziły skuteczność oczyszczania spalin zarówno pod względem emisji składników gazowych, jak i cząstek stałych.*

Słowa kluczowe: filtr GPF, cząstki stałe, RDE, normy EURO, emisja

1. Introduction

Moving vehicles with combustion engines emit harmful compounds from the exhaust systems to the atmosphere. The combustion of fossil fuels creates substances that must be removed from the combustion chamber to make room for a new fuel-air mixture. Their environmental damage has already been noticed in the past [2, 6, 8, 13, 27]. The limitation in the admission of PC (Passenger Car) vehicles was introduced in the form of standards for mass emission of a given toxic component per unit of distance (g/km). Limited compounds currently include carbon monoxide, hydrocarbons, nitrogen oxides and particulate matter [24]. With the development of measurement technology, these compounds are divided into smaller groups, and an example of such activities is the refinement of various aspects of particulate matter emission. They were especially limited in Diesel engines mainly due to their significant and noticeable concentration in the exhaust, observable even with the naked eye [1, 3, 9, 17]. The development of construction techniques and introduction of direct gasoline injection in spark-ignition engines, apart from the advantages of increasing efficiency, is associated with several disadvantages. The main drawback caused by the shortening of gasoline evaporation time is the associated increased emission of solid particles [10, 22, 23, 26]. This problem was noticed by research centers and past work of co-authors. Petrol, being a lighter fraction of crude oil, evaporates more easily than diesel, creating smaller particles [5, 7, 15, 26].

This problem was noticed by research centers and past works of co-authors [9, 10, 14, 18–21]. In September 2017, EURO 6c emission standard became legally binding for new engines and vehicles, which limited the number of particulates to the same level as in the case of vehicles with CI engines and amounted to $6 \cdot 10^{11}/\text{km}$ [24]. Meeting this limit is problematic for most modern units, where it is not possible to meet the standard without an additional exhaust aftertreatment system. Many brands stopped the production of some units for some time, developing exhaust aftertreatment systems [11]. The particulate filter (GPF) for gasoline engines is characterized by the same construction and principle of operation as the design in diesel engines. Operating conditions differ, mainly temperature, oxygen content and the distribution of diameters of solid particles in the exhaust [4, 16, 23].

The vehicle tested in the article meets the EURO 6c norm and is equipped with a particulate filter (GPF). The work described in the article is aimed at checking the actual vehicle emission carried out in accordance with the RDE (Real Driving Emission) methodology using PEMS (Portable Emissions Measurement System) equipment.

2. Tested vehicle

The tested vehicle was equipped with a gasoline engine with direct fuel injection made in line with the concept of downsizing (tab. 1). It replaced the engine with a stroke volume

of 1.8 dm³ and indirect fuel injection, characterized by similar values of torque and maximum power [11]. The vehicle was characterized by its own weight of 1229 kg.

Table 1

Technical data of engine [6]

Type of ignition	Spark ignition
Type of injection	Direct injection
Displacement	998 ccm
Number of cylinders	3
Number of valves	12
Maximum power	95 kW at 5500 RPM
Maximum torque	200 Nm at 2250 RPM
Homologation	EURO 6c

Before starting the test, the vehicle was checked by a diagnostic tester for any defects. During the test the vehicle was fully refueled, there were two people inside along with the test equipment. During the test, the fuel tank was full, there were two people and the test apparatus inside, its total weight was about 1,600 kg (fig. 1).



Fig. 1. View of the examined vehicle equipped with PEMS analyzers

3. Test Methodology

The equipment from the PEMS (Portable Emissions Measurement System) group was used for the research. It is a group of mobile analyzers that allows measuring the concentration of individual toxic components contained in the exhaust gases. Measurement carried out with them is done indirectly, and the use of exhaust gas flow meter allows to determine the mass of a given compound. After dividing the mass by the distance covered by the vehicle, the road emission can be determined, which enables comparing the results of the drive to the limits contained in the emission norm.

The first used analyzer was SEMTECH DS. Sensors Inc. (fig. 2a). It was used to measure gaseous components and examine the instantaneous flow of exhaust gas through the SEMTECH EFM-HS (High Speed Exhaust Flow Meter). The exhaust sample is transported through a heated tube, the temperature of which is kept at about 191°C, to prevent condensation of hydrocarbons [25]. The prepared sample after filtration from the solid fraction goes to the flame ionization analyzer, powered by hydrogen. Then the sample is cooled and goes to the next absorption analyzers (NDIR and NDUV), and finally to the electrochemical oxygen sensor. The analyzer takes into account the delay in the exhaust during the processing of results in specialized software. The system communicates with the OBD system of the vehicle, which enables the reading of engine operating parameters, as well as with the GPS receiver and the ambient temperature sensor.

The EEPS TSI 3090 analyzer (fig. 2b) was used to read the number and mass of the particulates. It is a particle counter, which in addition to measuring the number also allows to determine their dimensional diameters distribution. Particles reaching the analyzer are charged positively and then repelled by the centrally placed electrode. By repelling charged particles to smaller, negatively charged plates, the obtained potential difference is converted into information on the number of particles of a given diameter (mass) [25]. The larger the particle the lower placed electrode it reaches due to its larger mass, which allows to determine the dimensional distribution of the diameters [12].

Dimensional distribution is not limited by any norms, however studies on the harmfulness of particles to human health have proved that particles with the smallest diameters are particularly dangerous [5, 8, 10, 12, 16, 22]. For this reason, the authors will focus on them in this analysis. Before the tests, the analyzers were calibrated with standard gases and zeroed at the beginning of measurements in accordance with the guidelines of the manufacturers of individual analyzers. An electric generator was used to power them during the tests.

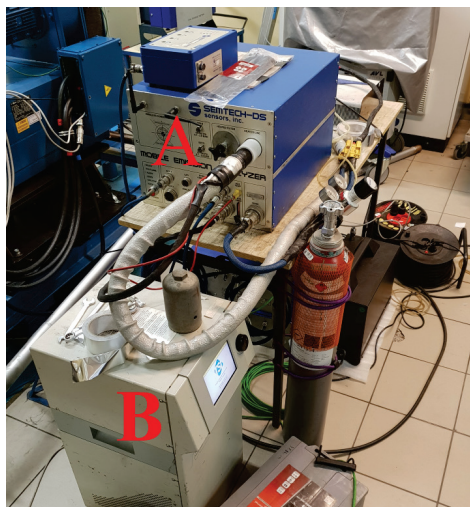


Fig. 2. PEMS equipment during calibration process: a) SEMTECH DS, b) EEPS TSI

According to the RDE requirements, the test must consist of three sections, urban, suburban and highway driving. Their length must be between 23 and 43% of the total distance. Movement in individual zones is limited by the speed of the vehicle, which is from 0 to 60, 60-90 and 90-140 km/h in each section respectively. The test time should not exceed 2 hours and the minimum distance of each section is 16 km [24]. The route requirements are discussed in more detail in [5]. According to the requirements, a route located in the Poznań agglomeration was chosen (fig. 3). This is important, as the congestion changes with a different time, and there is a risk of not meeting the speed or time condition of the test.

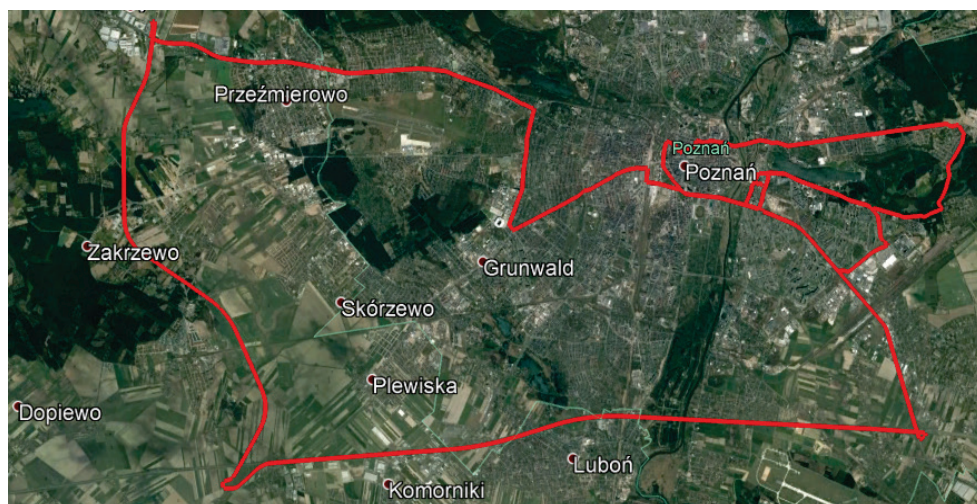


Fig. 3. The test route used for RDE drive cycle

4. Results

The obtained results of road emissions of toxic components were compared with the limits contained in the norm (tab. 2). In addition, fuel consumption has been determined using the carbon balance method, which during research is significantly different from the manufacturer's data obtained in the WLTC cycle (Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle), which in the urban, rural and motorway cycle, respectively 6.1, 4.8 and 4.1 dm³/100 km [11].

Table 2

The results of the emission of gaseous components and fuel consumption in individual drive cycles

	Fuel consumption [dm ³ /100km]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
Urban	8.03	0.11	0.28	0.04
Rural	5.94	0.19	0.01	0.02
Motorway	6.16	0.30	0.02	0.52
Weighted average	6.76	0.21	0.17	0.08
EURO 6 limit	-	1	0.1	0.06

Referring to the results obtained, the road toxic components emission of the tested vehicle turned out to be lower for CO, and exceeded for HC and NO_x. Fuel consumption during tests was higher in all cycles, differing from the manufacturer's data (for the urban, extra-urban and highway sections it should be 6.1, 4.8 and 4.1 dm³, respectively). In addition, when driving on the motorway, the consumption was higher than outside the city, however, it could have been due to the increased air resistance caused by the open hatch.

Legislators introduced the so-called Conformity Factor (CF) for tests carried out in accordance with RDE, which is a coefficient by which the normative value is increased and currently equals 2.1 and will be reduced to 1.6 in the future [24]. Comparison of results with limits after CF increase is shown in fig. 4.

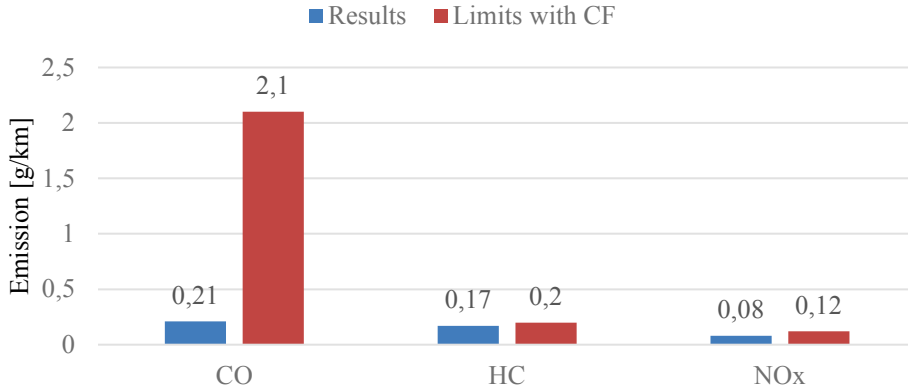


Fig. 4. The results of road emissions of gaseous components compared to norm limits

Once CF is included, all components are within the limit values. Analysis of particulate emissions was done for mass, number and dimensional distribution. As in the case of gas compounds in tab. 3, the results of individual cycles are presented, whereas in the graphical form the results were compared to the homologation norm again after adding the CF multipliers (fig. 5).

Table 3

Particulate emission results in terms of mass and number

	PM [g/km]	PN [#/km]
Urban	7.23	7.37E+11
Rural	3.64	4.08E+11
Motorway	3.98	4.39E+11
Weighted average	5.44	6.36E+11

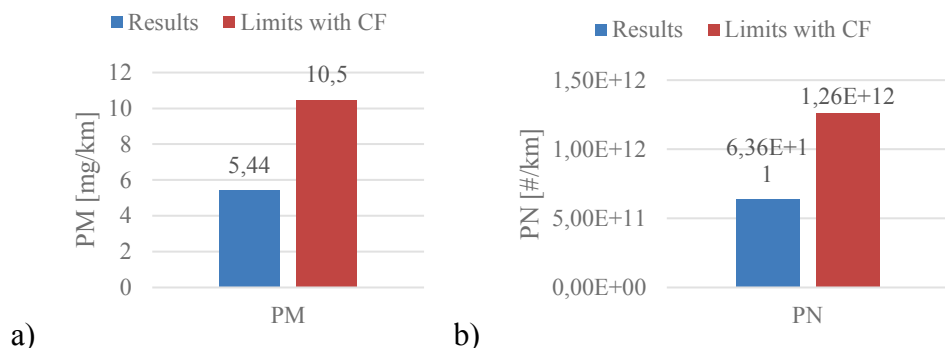


Fig. 5. Road emission of the particles: a) particulate matter, b) particulate number

Both in terms of mass and particle number, the vehicle emitted less pollutants than in the emission norm, but only after CF. Obtained results of both mass and number of solid particles prove that even the use of a particulate filter does not drastically reduce both of these values. Laboratory tests carried out earlier have also proved filters to be more effective for gasoline engines, mainly due to the higher temperature of exhaust gases than in diesel engines [10, 11]. As mentioned before, the dimensional distribution of solid particles diameters was also analyzed (fig. 6).

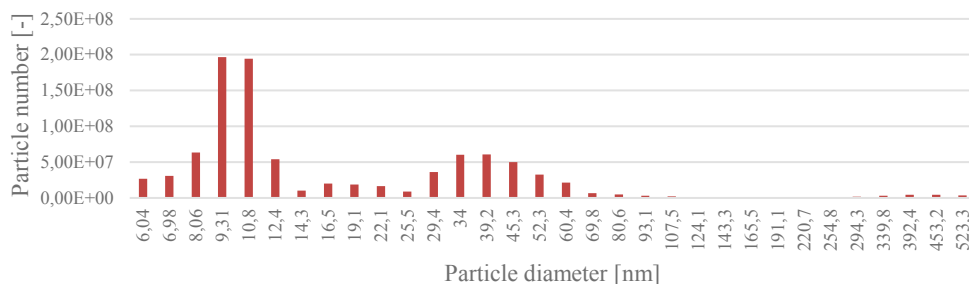


Fig. 6. Dimensional distribution of particle diameters obtained during the tests

When analyzing the dimensional distribution, two distinct peaks can be observed in the diagrams for the 10 and 40 nm diameters. The first is related to the effect of nucleation and the second is related to particle agglomeration [10, 22]. Compared to previous studies of authors regarding emissions from vehicles without particulate filters, a smaller number of small diameter particles can be clearly seen [12]. It is not possible to state with confidence what particle size the filter affects the most, since a significant number of small particles still exist, although the ratio of particle dimensions differs with respect to older studies.

5. Results

Testing with PEMS analyzers is not a flawless method but still remains as the best way to determine the real emissivity of motor vehicles. It is thanks to these devices, that it was possible to discover the problem of excessive emissivity from combustion engines in relation to laboratory tests, although this is related to the increased mass and rolling resistance of the tested vehicle.

The tests carried out within the framework of the article of a vehicle meeting the EURO 6c type approval norms have proven that the limits contained in the norm have been met after taking into account the CF factor, which at the moment is 2.1. After reducing it to 1.5 which is expected to happen in the near future, some of the values will not fit within the set limits. The tests have proven that the only compound whose emission is not a problem for gasoline engines is carbon monoxide. In terms of particulate matter, one can notice a decrease in the proportion of small particles, but their share is still significant, and constructors should continue to limit their emission. Future studies by authors will refer to the comparison of a vehicle with the same engine tested with and without filter.

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).

6. References

1. Brzozowski K., Nowakowski J.: Toksyczność spalin silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach zmiennego obciążenia dla różnych wartości parametrów regulacyjnych. *Eksploatacja i Niezawodność*, nr 4, 2011.
2. Chłopek Z.: An efficiency evaluation of the CRT particulate matter filter in static and dynamic engine operating conditions. *Combustion Engines* Nr 2007–SC3.
3. Chłopek Z.: Effects of using CRT particulate matter filters for self ignition engines. *Eksploatacja i Niezawodność* nr 4/2007.
4. Chłopek Z.: Modele behawiorystyczne emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł transportu drogowego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Politechnika Warszawska*, zeszyt 1/82, 2011.
5. Chłopek Z, Skibiński F.: Wprowadzenie do tematyki emisji cząstek stałych PM 2,5 z transportu samochodowego. *Transport Samochodowy*, No.3, 2010.
6. Eastwood P.: *Particulate emissions from motor vehicles*. Chichester, John Wiley, 2008.
7. Exceedance of air quality limit values in urban areas (CSI 004) - Assessment published Oct 2013. EEA – European Environmental Agency.

8. Forsberg B., Hansson HC., Johansson C., Areskoug H., Persson K., Järholm B.: Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Journal of the Human Environment*, 34(1), 2005.
9. 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, 2013.
10. Fuc P., Lijewski P., Siedlecki M., Sokolnicka B., Szymlet N.: Analysis of particle mass and number emission from an SI engine with direct fuel injection and a particulate filter. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 421, 2018.
11. Honda's 2018 Engines data.
12. Jasinski R.: Mass and number analysis of particles emitted during aircraft landing, *E3S Web Conf.* 44 00057, 2018.
13. Kruczyński S.W.: Eksploatacja trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych - dezaktywacja termiczna. *Eksploatacja i Niezawodność*, Vol. 14, No. 3, 2012.
14. Lijewski P., Merkisz J., Fuc P.: Research of Exhaust Emissions from a Harvester Diesel Engine with the Use of Portable Emission Measurement System. *Croatian Journal of Forest Engineering* 34.
15. Mayer A., Czerwinski J., Scheidegger P.: Trapping Efficiency Depending on Particle Size. *SAE* 960472.
16. Mayer A., Kasper M., Mosimann T., Legerer F., Czerwinski J., Emmenegger L., Mohn, J., Ulrich A., Kirchen P.: Nanoparticle-emission of EURO 4 and EURO 5 HDV compared to EURO 3 with and without DPF. *SAE Tech. Pap.* 2007-01-11:1-9.
17. Merkisz, J., Fuc, P., Lijewski, P., Ziolkowski A., Wojciechowski K.: 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 Electric Materials* 44/2015.
18. Merkisz J., Lijewski P., Fuć P., Weymann S.: Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Vol. 15, , no. 4, 2013.
19. Merkisz J., Lijewski P., Walasik S.: Analiza warunków pracy silników pojazdów o zastosowaniach poza drogowych w aspekcie przepisów dotyczących emisji związków toksycznych spalin. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, nr 1, 2010.
20. Merkisz J., Pielecha J., Fuc P., Lijewski P.: The analysis of the PEMS measurements of the exhaust emissions from city buses using different research procedures *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, 2012, DOI 10.1109/VPPC.2012.6422698.
21. Merkisz J., Pielecha J., Lijewski P., Merkisz-Guranowska A., Nowak M.: Exhaust emissions from vehicles in real traffic conditions in the Poznan agglomeration. 10.2495/AIR130031.
22. Myung C.L, Park S.: Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review, *International Journal of Automotive Technology*, 13(1), 2012.

23. Pielecha I.: Diagnostics of stratified charge combustion under the conditions of multiple gasoline direct injection. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 118/2014 217-225. 10.1007/s10973-014-3956-3.
24. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 136/2014 z dnia 11 lutego 2014 r.
25. Semtech DS. and EEPS TSI Manuals.
26. Siedlecki M., Galant M., Rymaniak L., Ziolkowski A.: Badania emisji zanieczyszczeń pojazdu wyposażonego w silnik z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach eksploatacji, *AUTOBUSY* 12/2017.
27. Sobieszkański M., Brzozowski K., Nowakowski J., Tekielak M.: Wpływ parametrów regulacyjnych silnika z ZS na zawartość składników toksycznych i zadymienie spalin. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, nr 3, 2008.

EMISJA SKŁADNIKÓW TOKSYCZNYCH SPALIN W RZECZYWISTYCH WARUNKACH EKSPLOATACJI Z SILNIKA POJAZDU SPEŁNIAJĄCEGO NORMĘ HOMOLOGACYJNĄ EURO 6C

1. Wprowadzenie

Pojazdy samochodowe podczas eksploatacji emitują związki szkodliwe z układów wylotowych. Na skutek spalania paliw kopalnych powstają substancje, które muszą być usunięte z komory spalania, by zrobić miejsce na nową mieszankę. Ich szkodliwość na środowisko została już zauważona w przeszłości [2, 6, 8, 13, 27]. Ograniczenia w przypadku pojazdów klasy PC (ang. *Passenger Car*) zostały wprowadzone w postaci norm emisji masy danego składnika toksycznego na jednostkę odległości. Do limitowanych związków zgodnie z obecną normą EURO 6c należy emisja drogowa tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu oraz cząstek stałych [24]. Wraz z rozwojem technologii związki te są dzielone na jeszcze mniejsze grupy, a przykładem takich działań jest uściślenie emisji cząstek stałych. Emisja cząstek stałych była wcześniej limitowana w silnikach Diesla, głównie poprzez właściwości oleju napędowego, który wolniej odparowuje niż benzyna [1, 3, 9, 17]. Rozwój techniki i wprowadzenie bezpośredniego wtrysku benzyny w silnikach o zapłonie iskrowym, poza zaletami jak zwiększenie sprawności, wiąże się z kilkoma wadami. Główną, spowodowaną skróceniem czasu odparowania benzyny, jest zwiększona emisja cząstek stałych [10, 22, 23, 26]. W porównaniu do silników z zapłonem samoczynnym (ZS) powstające cząstki mają mniejsze średnice i są bardziej niebezpieczne dla zdrowia ludzi [5, 7, 15, 26].

Problem ten został zauważony przez ośrodki badawcze oraz współautorów [9, 10, 14, 18–21]. We wrześniu 2017 r. dla nowych silników i pojazdów zaczęła obowiązywać norma emisji EURO 6c, która ograniczyła liczbę cząstek stałych do tego samego poziomu jak w przypadku pojazdów z silnikami ZS i wynosi ona $6 \cdot 10^{11}/\text{km}$ [24]. Spełnienie tego limitu jest problematyczne dla większości jednostek, gdzie bez dodatkowego układu oczyszczania spalin nie jest to możliwe. Spowodowało to wycofanie na jakiś czas niektórych jednostek benzynowych [11]. Filtr cząstek stałych (GPF – *Gasoline Particulate Filter*) przeznaczony dla silników ZI charakteryzuje się taką samą budową i zasadą działania jak konstrukcje w silnikach Diesla, różnią się jego warunki pracy, przede wszystkim temperatura, zawartość tlenu oraz rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych [4, 16, 23].

Badany pojazd jest przykładem doposażenia przez producenta w filtr cząstek stałych istniejącego wcześniej silnika. Przeprowadzone prace miały na celu sprawdzenie rzeczywistej emisji drogowej pojazdu przeprowadzonej zgodnie z metodyką RDE (ang. *Real Driving Emission*) i porównania jej do limitów homologacyjnych.

2. Badany obiekt

Badany pojazd wyposażony był w silnik benzynowy z bezpośrednim wtryskiem paliwa wykonany w idei downsizingu (tab. 1). Zastąpił on w ofercie silnik o objętości skokowej 1.8 dm³ i pośrednim wtrysku paliwa przy zachowaniu zbliżonych osiągnięć [11]. Pojazd charakteryzował się masą własną 1229 kg.

Tabela 1

Dane techniczne silnika badanego pojazdu [11]

Rodzaj zapłonu	Zapłon iskrowy
Układ wtryskowy	Bezpośredni
Objętość skokowa	998 cm ³
Liczba cylindrów	3
Liczba zaworów	12
Moc maksymalna	95 kW przy 5500 obr/min
Maksymalny moment obrotowy	200 Nm przy 2250 obr/min
Norma homologacyjna	EURO 6c

Przed przystąpieniem do badania pojazd został sprawdzony testerem diagnostycznym pod kątem ewentualnych usterek. W czasie badania zbiornik paliwa był pełen, w środku znajdowały się dwie osoby oraz aparatura badawcza, masa całkowita wyniosła ok. 1600 kg (rys. 1).



Rys. 1. Widok badanego pojazdu z aparaturą badawczą

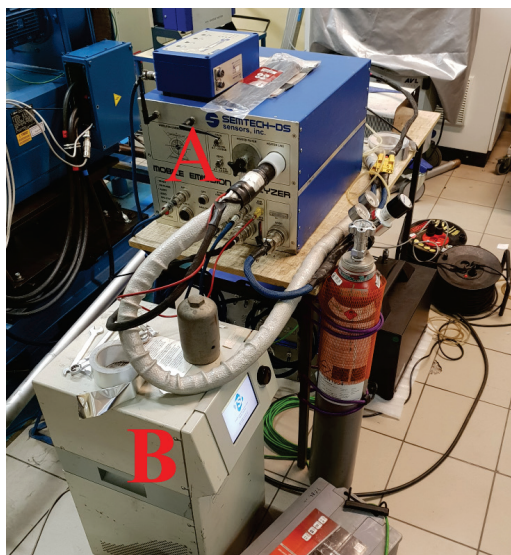
3. Metodyka pomiaru

Do badań wykorzystano aparaturę z grupy PEMS (ang. *Portable Emissions Measurement System*). Jest to grupa mobilnych urządzeń, które umożliwiają pomiar stężenia poszczególnych składników toksycznych zawartych w gazach wylotowych. Pomiar w nich przeprowadzany odbywa się w sposób pośredni przy pomocy zespołu analizatorów, a zastosowanie w układzie wylotowym przepływomierza spalin umożliwia wyznaczenie masy danego związku. Po podzieleniu masy danego składnika przez przejechany przez pojazd dystans otrzymuje się wynik emisji drogowej co umożliwia porównanie wyników przejazdu do limitów zawartych w normie homologacyjnej.

Pierwszym użytym analizatorem był SEMTECH DS. firmy Sensors Inc (rys. 2a). Odpowiadał on za pomiar składników gazowych oraz badanie chwilowego przepływu spalin poprzez Moduł SEMTECH EFM-HS (ang. High Speed Exhaust Flow Meter). Próbkę spalin jest transportowana poprzez drogę grzaną, której temperatura wynosi około 191°C, ma to zapobiegać wykraplaniu się węglowodorów [25]. Tak przygotowana próbka po przefiltrowaniu z frakcji stałych trafia do analizatora płomieniowo-jonizacyjnego, zasilanego wodorem. Następnie próbka jest schładzana i trafia do kolejnych analizatorów absorpcyjnych (NDIR i NDUV), a na końcu do elektrochemicznego czujnika tlenu. System komunikuje się z systemem OBD (ang. *On-Board Diagnostics*) pojazdu, co umożliwia odczyt parametrów pracy silnika, a także z odbiornikiem GPS.

Do odczytu liczby i masy cząstek stałych został wykorzystany analizator EEPS TSI 3090 (rys. 2b). Jest to licznik cząstek stałych, który poza pomiarem liczby określa także rozkład wymiarowy średnic. Umożliwia on także wyliczenie masy na podstawie danych o gęstości cząstek. Cząstki, trafiając do analizatora, ładowane są dodatnio, a następnie odpychane przez umieszczoną centralnie elektrodę, odpychając naładowane cząstki na mniejsze płytki naładowane ujemnie [25]. Im cząstka jest większa, na skutek większej masy trafia na niżej umieszczoną elektrodę, co umożliwia zbadanie rozkładu wymiarowego [12].

Rozkład wymiarowy nie jest w żaden sposób limitowany normami, jednakże wieloletnie badania nad szkodliwością cząstek na zdrowie człowieka udowodniły, że szczególnie niebezpieczne są cząstki o najmniejszych średnicach [5, 8, 10, 12, 16, 22]. Przed badaniami aparatura została skalibrowana gazami wzorcowymi oraz wyzerowana na powietrzu otoczenia przed rozpoczęciem badań zgodnie z wytycznymi producentów poszczególnych analizatorów. Do ich zasilania w czasie badań został wykorzystany agregat prądotwórczy.



Rys. 2. Aparatura PEMS podczas procesu kalibracji: a) SEMTECH DS, b) EEPS TSI

Zgodnie z wymaganiami RDE, test musi składać się z trzech sekcji: jazdy miejskiej, podmiejskiej i autostradowej. Ich długość musi zawierać się między 23 a 43% całkowitego dystansu. Podział na poszczególne strefy oznaczony jest prędkością pojazdu, która wynosi odpowiednio 0–60, 60–90 oraz 90–140 km/h. Czas testu nie powinien przekroczyć 2 godz., a minimalny dystans w każdej ze stref to 16 km [24]. Zgodnie z tymi wymaganiami została wybrana trasa przejazdu spełniająca te zalecenia, sprawdzona już w poprzednich badaniach i wielokrotnie wykorzystywana do badań zgodnie z procedurą RDE (rys. 3). Jest to istotne, gdyż w różnych godzinach przeprowadzania badań zmienia się kongestia i istnieje ryzyko niespełnienia warunku prędkości bądź czasu.



Rys. 3. Trasa badań

4. Wyniki

Otrzymane wyniki emisji drogowej toksycznych składników toksycznych zostały zestawione z limitami zawartymi w normach (tab. 2). Dodatkowo przy pomocy metody bilansu węgla zostało wyznaczone zużycie paliwa, które podczas badań znacznie różniło się od danych producenta uzyskanych w cyklu WLTC (ang. Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle). Wartości uzyskane homologacyjnie w cyklu miejskim, pozamiejskim i autostradowym to odpowiednio 6,1, 4,8 i 4,1 $\text{dm}^3/100 \text{ km}$ [11].

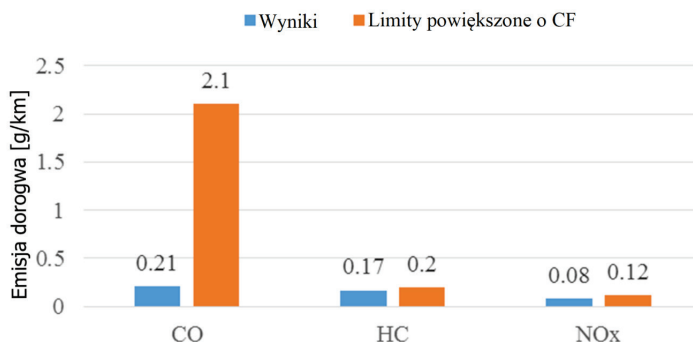
Tabela 2

Wyniki emisji toksycznych składników gazowych w poszczególnych cyklach badawczych

	Zużycie paliwa [$\text{dm}^3/100\text{km}$]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO _x [g/km]
Cykl miejski	8,03	0,11	0,28	0,04
Pozamiejski	5,94	0,19	0,01	0,02
Autostradowy	6,16	0,30	0,02	0,52
Średnia ważona	6,76	0,21	0,17	0,08
EURO 6 limit	-	1	0,1	0,06

Odnosząc się do otrzymanych wyników, badany pojazd wyemitował mniejszą ilość składników toksycznych w przypadku CO, a przekroczył ją w przypadku HC i NO_x. Ustawodawca dla testów przeprowadzanych zgodnie z RDE wprowadził tzw. Comfornity

Factor (CF) – współczynnik, o który powiększa się wartość emisji dopuszczanej normami. Obecnie ten wskaźnik wynosi 2,1, a w przyszłości zostanie zmniejszony do 1,6 [24]. Porównanie graficzne wyników z limitami po zwiększeniu o CF przedstawiono na rys. 4.



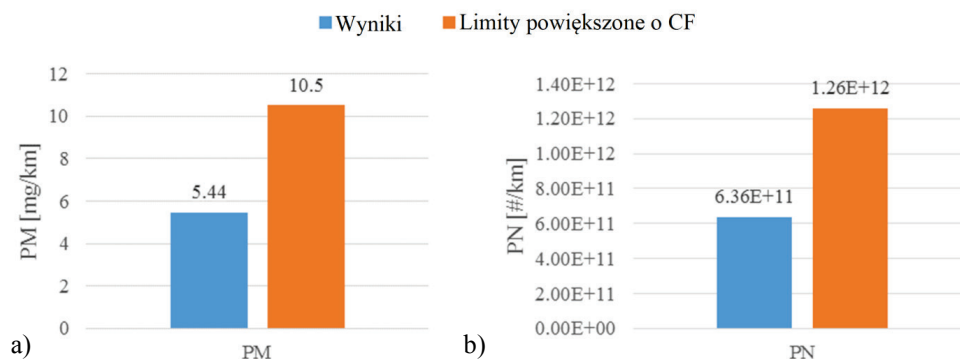
Rys. 4. Wyniki emisji drogowej składników gazowych w stosunku do norm

Analiza emisji cząstek stałych dotyczyła masy liczby i rozkładu wymiarowego. Dwie pierwsze zmienne, tak jak w przypadku związków gazowych, porównano do normy homologacyjnej (tab. 3, rys. 5).

Tabela 3

Emisja cząstek stałych w aspekcie masy i liczby

	PM [mg/km]	PN [# /km]
Cykl miejski	7,23	7.37E+11
Cykl pozamiejski	3,64	4.08E+11
Cykl autostradowy	3,98	4.39E+11
Średnia ważona	5,44	6.36E+11



Rys. 5. Emisja drogowa cząstek stałych: a) masa, b) liczba

Zarówno pod względem masy, jak i liczby cząstek pojazd również wyemitował mniej zanieczyszczeń, niż jest to zawarte w normie homologacyjnej. Obydwa uzyskane wyniki różnią się ok. dwukrotnie od limitów ustalonych przez ustawodawcę. Jak wcześniej wspomniano, analizie poddano również rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych (rys. 6).



Rys. 6. Rozkład wymiarowy średnic cząstek stałych

Analizując rozkład wymiarowy, zaobserwować można wyraźne dwa piki w zakresie średnic 10 i 40 nm. Pierwszy związany jest z działaniem nukleacji, a drugi z aglomeracji cząstek stałych [10, 22]. W stosunku do poprzednich badań autorów, gdzie badane były pojazdy samochodowe bez filtrów cząstek stałych wyraźnie można zauważyć mniejszą liczbę cząstek o niewielkich średnicach, jednak sam rozkład zbliżony jest do tego uzyskiwanego w powietrzu otoczenia [12].

5. Wnioski

Badanie analizatorami PEMS ma pewne wady, ale obecnie jest najlepszym sposobem na określenie rzeczywistej emisyjności pojazdów samochodowych. To m.in. dzięki nim możliwe było stwierdzenie problemu nadmiernej emisyjności w stosunku do badań laboratoryjnych i związanej z tym afery zwanej Dieselgate.

Opisane w artykule badania pojazdu spełniającego normę homologacyjną EURO 6c dowiodły jego ekologiczności oraz potwierdzenia spełnienia limitów laboratoryjnych uzyskanych podczas homologacji po uwzględnieniu współczynników CF. Zastosowany w układzie wylotowym filtr cząstek stałych nie działa wybiórczo i zmniejsza zawartość cząstek wszystkich średnic. Jego skuteczność może być związana z wyższą temperaturą spalin niż w przypadku silnika Diesla. Uzyskany rozkład wymiarowy cząstek stałych jest zbliżony do tego, który da się zaobserwować dla powietrza otoczenia na terenie Poznania. Przyszłe prace autorów dotyczyć będą określenia skuteczności filtra po przeniesieniu punktów pracy silnika na dynamiczną hamownię silnikową.

Podziękowanie

Badania finansowane przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Regionalnego – Lubuskie 2020(RPLB.01.01.00-08-0055/16-00).

6. Literatura

1. Brzozowski K., Nowakowski J.: Toksyczność spalin silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach zmiennego obciążenia dla różnych wartości parametrów regulacyjnych. *Eksploatacja i Niezawodność*, nr 4, 2011.
2. Chłopek Z.: An efficiency evaluation of the CRT particulate matter filter in static and dynamic engine operating conditions. *Combustion Engines* Nr 2007–SC3.
3. Chłopek Z.: Effects of using CRT particulate matter filters for self ignition engines. *Eksploatacja i Niezawodność* nr 4/2007.
4. Chłopek Z.: Modele behawiorystyczne emisji cząstek stałych PM10 ze źródeł transportu drogowego. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Politechnika Warszawska*, zeszyt 1/82, 2011.
5. Chłopek Z., Skibiński F.: Wprowadzenie do tematyki emisji cząstek stałych PM 2,5 z transportu samochodowego. *Transport Samochodowy*, No.3, 2010.
6. Eastwood P.: *Particulate emissions from motor vehicles*. Chichester, John Wiley, 2008.
7. Exceedance of air quality limit values in urban areas (CSI 004) - Assessment published Oct 2013. EEA – European Environmental Agency.
8. Forsberg B., Hansson HC., Johansson C., Areskoug H., Persson K., Järholm B.: Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Journal of the Human Environment*, 34(1), 2005.
9. 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, 2013.
10. Fuc P., Lijewski P., Siedlecki M., Sokolnicka B., Szymlet N.: Analysis of particle mass and number emission from an SI engine with direct fuel injection and a particulate filter. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 421, 2018.
11. Honda's 2018 Engines data.
12. Jasinski R.: Mass and number analysis of particles emitted during aircraft landing, E3S Web Conf. 44 00057, 2018.
13. Kruczyński S.W.: Eksploatacja trójfunkcyjnych reaktorów katalitycznych - dezaktywacja termiczna. *Eksploatacja i Niezawodność*, Vol. 14, No. 3, 2012.
14. Lijewski P., Merkisz J., Fuc P.: Research of Exhaust Emissions from a Harvester Diesel Engine with the Use of Portable Emission Measurement System. *Croatian Journal of Forest Engineering* 34.
15. Mayer A., Czerwinski J., Scheidegger P.: Trapping Efficiency Depending on Particle Size. SAE 960472.
16. Mayer A., Kasper M., Mosimann T., Legerer F., Czerwinski J., Emmenegger L., Mohn, J., Ulrich A., Kirchen P.: Nanoparticle-emission of EURO 4 and EURO 5 HDV compared to EURO 3 with and without DPF. SAE Tech. Pap. 2007-01-11:1-9.
17. Merkisz, J., Fuc, P., Lijewski, P., Ziolkowski A., Wojciechowski K.: 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 Electric Materials* 44/2015.
18. Merkisz J., Lijewski P., Fuć P., Weymann S.: Exhaust emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Vol. 15, , no. 4, 2013.
 19. Merkisz J., Lijewski P., Walasik S.: Analiza warunków pracy silników pojazdów o zastosowaniach poza drogowych w aspekcie przepisów dotyczących emisji związków toksycznych spalin. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, nr 1, 2010.
 20. Merkisz J., Pielecha J., Fuc P., Lijewski P.: The analysis of the PEMS measurements of the exhaust emissions from city buses using different research procedures *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, 2012, DOI 10.1109/VPPC.2012.6422698.
 21. Merkisz J., Pielecha J., Lijewski P., Merkisz-Guranowska A., Nowak M.: Exhaust emissions from vehicles in real traffic conditions in the Poznan agglomeration. 10.2495/AIR130031.
 22. Myung C.L, Park S.: Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review, *International Journal of Automotive Technology*, 13(1), 2012.
 23. Pielecha I.: Diagnostics of stratified charge combustion under the conditions of multiple gasoline direct injection. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 118/2014 217-225. 10.1007/s10973-014-3956-3.
 24. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 136/2014 z dnia 11 lutego 2014 r.
 25. Semtech DS. and EEPS TSI Manuals.
 26. Siedlecki M., Galant M., Rymaniak L., Ziolkowski A.: Badania emisji zanieczyszczeń pojazdu wyposażonego w silnik z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach eksploatacji, *AUTOBUSY* 12/2017.
 27. Sobieszkański M., Brzozowski K., Nowakowski J., Tekielak M.: Wpływ parametrów regulacyjnych silnika z ZS na zawartość składników toksycznych i zadymienie spalin. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, nr 3, 2008.