

Maciej Siedlecki, Paweł Fuć, Barbara Sokolnicka, Natalia Szymlet

Analiza wpływu konfiguracji pozasilnikowych układów oczyszczania spalin w aspekcie temperatury w układzie wylotowym silnika o zapłonie iskrowym

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2019.161

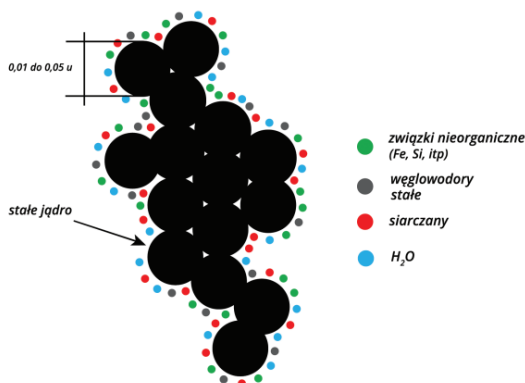
Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule omówiony został wpływ konfiguracji pozasilnikowych układów oczyszczania spalin na uzyskiwaną temperaturę gazów w po-szczególnych punktach układu wylotowego. Reaktory katalityczne i filtry do skutecznego oczyszczania gazów wymagają m. in. określonej temperatury. Temperatura ta zmniejsza się wraz z odległością od kolektora wylotowego. Badania przeprowadzone w artykule polegały na pomiarze temperatury spalin w różnych miejscach układu w symulowanych warunkach rzeczywistych na silnikowej hamowni dynamicznej w aspekcie zastosowania filtra cząstek stałych i jego skutecznego oczyszczania. Badanie temperatury przy pomocy termopar pozwoliło na ocenę możliwości ich zadziałania podczas eksploatacji miejskiej i pozamiejskiej w symulowanych warunkach rzeczywistych

Słowa kluczowe: temperatura gazów, oczyszczanie spalin, GPF.

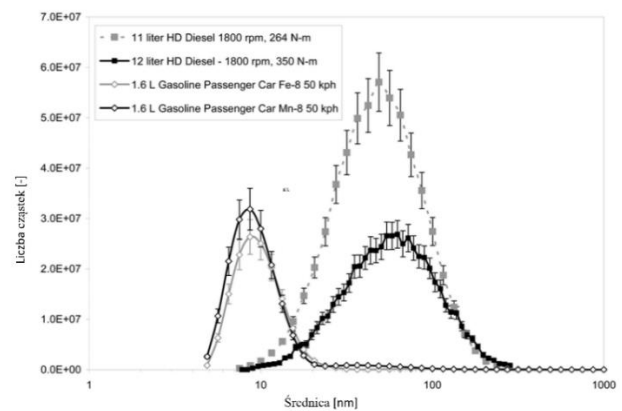
Wstęp

Występowanie systemów oczyszczania spalin jest zjawiskiem powszechnym w silnikach pojazdów przeznaczonych do różnych zastosowań. Każda z grup posiada przepisy legislacyjne, w których opisany jest maksymalny możliwy wpływ na środowisko w postaci norm emisji składników toksycznych spalin. Poprzez wprowadzenie norm i sukcesywne zmniejszanie ich na przestrzeni lat standardem stały się pozasilnikowe układy oczyszczania spalin. Wprowadzanie kolejnych obostrzeń i uszczegółowienia wymogów wobec poszczególnych związków toksycznych, liczba używanych układów zwiększała się. Przykładem takiego działania było wprowadzenie ograniczenia drogowej emisji cząstek stałych w normie EURO 5 wprowadzonej w 2009 roku w przypadku pojazdów klasy PC. Zmniejszono wtedy dość znacznie masę cząstek stałych (PM) oraz wprowadzono limit liczby cząstek stałych (PN) dla silników Diesla [3]. Miało to związek z emisją tzw. nanocząstek, które są szczególnie niebezpieczne dla ludzi [5, 6]. Cząstka stała składa się głównie z sadzy (rys. 1).



Rys. 1. Schemat budowy cząstki stałej [6]

Podobny problem został zauważony w przypadku silników spalinowych o zapłonie iskrowym, które coraz częściej wyposażone były w bezpośredni wtrysk paliwa do komory spalania. Szybsze odparowanie benzyny, niż ma to miejsce w przypadku oleju napędowego, powoduje zwiększony w stosunku do silników Diesla problem powstawania cząstek stałych o mniejszych średnicach (rys. 2).



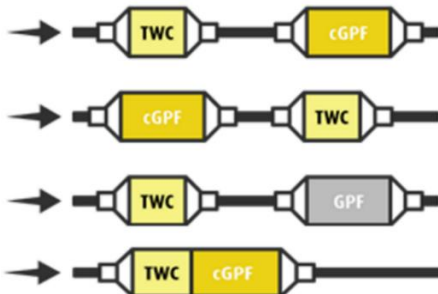
Rys. 2. Porównanie rozkładu średnic cząstek stałych z silników ZI i ZS [4]

Zjawisko to zostało zauważone przez współautorów niniejszej publikacji, jak i inne jednostki badawcze na świecie [2, 7, 9, 10]. We wrześniu 2017 roku wprowadzona została norma EURO 6c wprowadzająca dla silników z zapłonem iskrowym (ZI) i bezpośrednim wtryskiem paliwa (ang. Direct Injection - DI) limit liczby cząstek stałych wynoszący 6e11/km [3]. Spowodowało to konieczność przebudowy sprzedawanych w tym czasie silników benzynowych. Wiele producentów wycofało tymczasowo jednostki benzynowe wprowadzając je ponownie do oferty w późniejszym czasie, zazwyczaj po doposażeniu w filtr cząstek stałych (ang. Gasoline Particle Filter - GPF). Sam ustawodawca nie determinuje sposobu w jaki producenci pojazdów samochodowych spełnią założone limity emisji cząstek stałych.

Do zadziałania pozasilnikowych układów oczyszczania spalin wymagają określonego składu spalin oraz wysokiej temperatury [5, 11-13]. Dopiero wtedy zawarte na nośnikach katalizatory zaczynają działać i przeprowadzane są reakcje utleniania oraz redukcji. Aspekt temperatury był szczególnie istotny i nadal taki pozostaje w przypadku silników z zapłonem samoczynnym i ich eksploatacji w terenach miejskich, gdzie spaliny nie osiągały wymaganej do regeneracji temperatury. Powodowało to zapychanie się filtrów i konieczność ich wymiany [8, 12].

W przypadku stosowania benzyny jako paliwa uzyskiwana temperatura spalin jest wyższa m. in. poprzez pracę na mieszance zbliżonej do stechiometrycznej. Do procesu utleniania zgromadzonych cząstek stałych w przypadku filtra pokrytego katalitycznie wymagana jest temperatura około 420°C [5]. W ramach artykułu poddane badaniom zostały różne konfiguracje tj. użycie jedynie

trójfunkcyjnego reaktora katalitycznego (ang. Three Way Catalyst - TWC), reaktora utleniającego (ang. Diesel Oxidation Catalyst - DOC) oraz GPF w różnej odległości od silnika i ich wpływ na temperaturę gazów wylotowych (rys. 3). Taki temat podyktowany jest realizowanym projektem badawczym, w którym powstaje filtr cząstek stałych do pojazdów benzynowych z bezpośrednim wtryskiem paliwa.



Rys. 3. Możliwe konfiguracje filtra cząstek stałych w układzie wylotowym (cGPF - filtr pokryty katalitycznie) [1]

1. Metodyka badań

Badanym silnikiem była jednostka o objętości skokowej 1197 cm³ i mocy 77 kW wykonana w idei downsizingu i wyposażona w bezpośredni wtrysk paliwa (tab. 1). Silnik spełniał normę homologacyjną EURO 5, a przed badaniami był sprawdzony pod kątem ewentualnych usterek (rys. 4).

Tab. 1. Dane techniczne badanego silnika

Objętość skokowa [cm ³]	1197
Liczba i układ cylindrów / zaworów	4, rzędowy / 16
Rodzaj układu wtrysku	bezpośredni
Moc maksymalna [kW/KM]	77/105
Maksymalny moment obrotowy [Nm]	160
Skrzynia biegów	automatyczna

Cykl użyty do badań tj. punkty pracy silnika w postaci obciążenia silnika [Nm] oraz prędkości obrotowej wału korbowego [obr/min] stworzone zostały na podstawie rzeczywistego przejazdu pojazdu samochodowego wraz z aparaturą PEMS (Rys. 5). W tabeli została podkreślona użyta skrzynia biegów, gdyż w istotny sposób wpływa ona na otrzymywane punkty pracy. Przejazd ten odbył się zgodnie z wymogami RDE (ang. Real Driving Emission). Przejazd taki odbywa się trasą, której odcinki są ściśle określone pod względem prędkości poruszania się pojazdu, tak samo jak temperatura, występujące nachylenia itp. [3]



Rys. 4. Widok silnika na stanowisku hamulcowym; cyfry 1 i 2 oznaczają położenie punktów pomiarowych



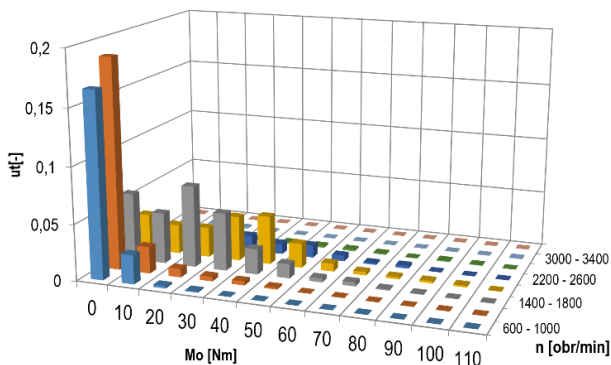
Rys. 5. Widok pojazdu użytego do pomiaru wskaźników pracy silnika w teście RDE

Podczas pomiarów na bieżąco przez system OBD szczytowane są chwilowe wartości prędkości poruszania się, prędkości obrotowej wału korbowego i momentu obrotowego w celu obliczenia chwilowej wytwarzanej mocy. Umożliwia to późniejsze określenie emisji zarówno drogowej jak i jednostkowej poszczególnych związków szkodliwych. W przypadku badań przeprowadzonych w artykule zapis punktów pracy silnika posłużył do przeniesienia tych punktów pracy na hamownię dynamiczną (tab. 2). Cykl badawczy powstał poprzez odtworzenie przejazdu miejskiego i pozamiejskiego, gdzie prędkość poruszania się wynosiła od 0 do 90 km/h oraz trzykrotne skrócenie czasu jego trwania do 1972 s (rys. 6-8).

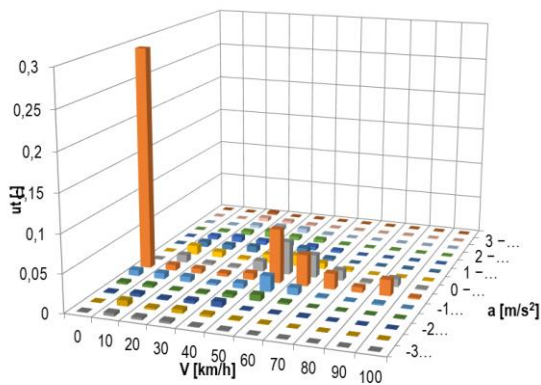
Tab. 2. Dane techniczne użytej hamowni

Moc pochłaniana:	do 200 kW
Masa hamulca:	400 [kg]
Czynnik chłodzący hamulca:	powietrze
Maksymalna prędkość obrotowa:	6000 - 18000 [obr/min] ¹
Kierunek obrotów hamulca:	dowolny
Maksymalny moment obrotowy:	18 - 2000 [Nm] ¹

Zrezygnowanie z cyklu autostradowego podyktowane było nadmierną temperaturą spalin w stosunku do zakresu badawczego posiadanej aparatury do badań emisyjności. Podczas jazdy autostradowej temperatura spalin zbliżała się do 900°C.



Rys. 7. Udział czasowy prędkości obrotowej i przyspieszeń w cyklu badawczym



Rys. 8. Udział czasowy prędkości jazdy i przyspieszeń w cyklu badawczym

Zaprezentowany cykl został zaimplementowany na dynamicznej hamowni silnikowej firmy AUTOMEX, która znajduje się w Laboratorium Instytutu Silników Spalinowych Politechniki Poznańskiej. Hamownia taka umożliwia odtworzenie rzeczywistego przejazdu poprzez specjalistyczne oprogramowanie i przeniesienie punktów pracy silnika. Określenie „hamownia dynamiczna” wynika ze zminimalizowanej maksymalnie inercji oraz krótkiego czasu przesterowania chwilowego, zadawanego obciążenia. Umożliwia to symulacje procesów niustalonych, jakie to mają miejsce podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdów samochodowych.

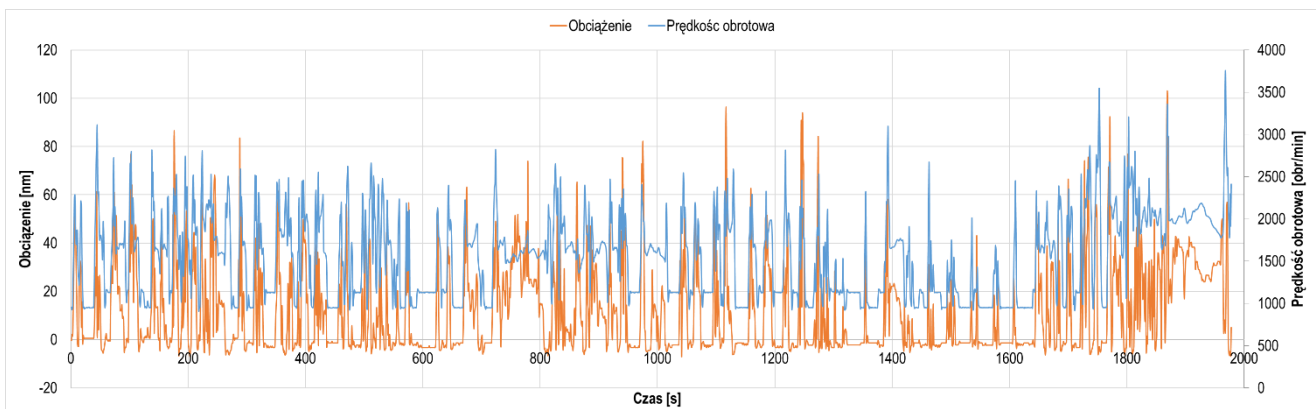
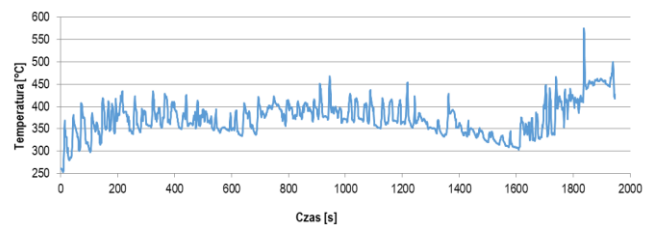
Do pomiaru temperatury zastosowano na potrzeby badań zestaw termopar, który został umieszczony w układzie wylotowym silnika spalinowych i podłączony do przetwornika DAQ 3000, który przeliczał wartość otrzymywanej różnicy potencjałów na temperaturę gazów wylotowych.

2. Wyniki pomiarów

W ramach badań zbadane zostały różne konfiguracje układów oczyszczania spalin do których należały:

1. Oryginalny, trójfunkcyjny reaktor katalityczny typu przepływowego.
2. Ceramiczny filtr cząstek stałych (GPF) z przepływem przez ściankę,
3. Metalowy reaktor utleniający (DOC) typu flow through z gęstości cel wynoszącą 200.
4. Metalowy filtr cząstek stałych z gęstością cel wynoszącą 200.
5. Zintegrowany układ prototypowy z trójfunkcyjnym reaktorem katalitycznym oraz filtrem cząstek stałych flow through z gęstości cel wynoszącą 400.

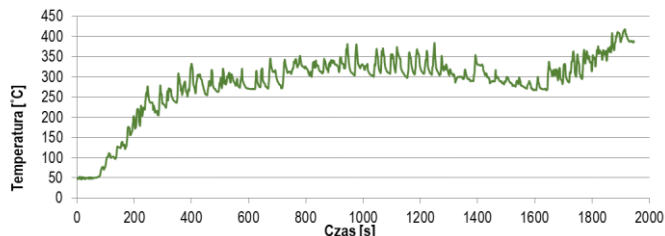
W przypadku pomiarów za układem turbodoładowania otrzymana temperatura była taka sama w każdym badanym cyklu. Występowały jedynie niewielkie kilkustopniowe różnice występujące na początku testu wskutek innej temperatury układu wylotowego. Przebieg temperatury za układem turbodoładowania przedstawiono na rys. 9. Uzyskana temperatura jest ściśle związana z momentem obrotowym silnika. Według wstępnych pomiarów przed układem turbodoładowania przez pierwsze około 200 s utrzymuje się większa temperatura. W czasie trwania cyklu oscyluje ona w zakresie 350-400°C (rys.9).



Rys. 6. Zależność prędkości obrotowej i obciążenia od czasu w użytym cyklu badawczym

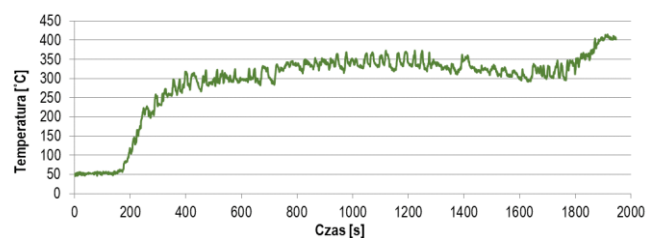
Rys. 9. Przebieg temperatury spalin za układem turbodoładowania

W przypadku zastosowania oryginalnego TWC (rys. 10), temperatura oscyluje w granicach 300-350°C osiągając średnio 286°C. Gazy z oryginalnego filtra cząstek stałych zbudowany z ceramiki osiągnął średnio 293 stopnie (rys. 11), a same skoki temperatury były o wiele mniejsze niż w przypadku układu TWC.

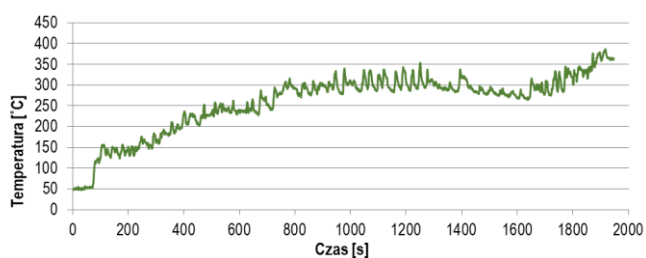


Rys. 10. Przebieg temperatury spalin za oryginalnym reaktorem katalitycznym

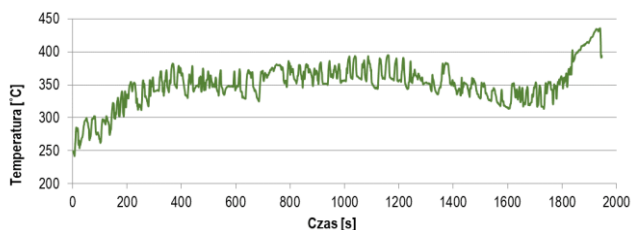
Połączenie GPF i DOC o nośniku metalowym nie wpłynęło znacząco na zmniejszenie temperatury osiągając średnio 259 stopni (rys. 12). Autorzy zaobserwowali, że na koniec badań uzyskana temperatura była wyższa niż w dwóch pierwszych przypadkach. Z tego powodu powtórzono badania na rozgrzanym układzie tj. przed badaniami zostało poddane wygrzewaniu średnim punktem pracy z cyklu miejskiego, gdzie temperatura spalin wynosi około 250°C. Spowodowało to wzrost średniej temperatury do aż 350 stopni (rys. 13), a uzyskiwane wartości były wyraźnie większe przez cały przebieg cyklu i nawet przy końcu różniły się o 60 stopni. Świadczy to o tym, że w poprzednim cyklu układ nie dogrzał się



Rys. 11. Przebieg temperatury spalin za ceramicznym GPF

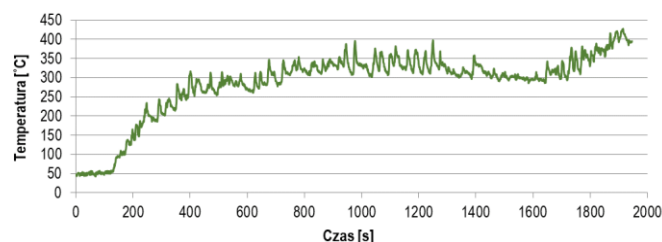


Rys. 12. Przebieg temperatury spalin za zestawem metalowych GPF i DOC

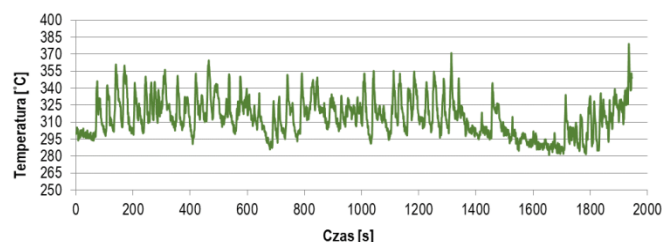


Rys. 13. Przebieg temperatury spalin za zestawem metalowych GPF i DOC po rozgrzaniu

Ostatnią badaną konfiguracją było TWC i GPF. Średnia temperatura wyniosła 287 °C (rys. 14). Po jego rozgrzaniu średnia wzrosła do 315 °C (rys. 15), czyli zmiana była stosunkowo niewielka.

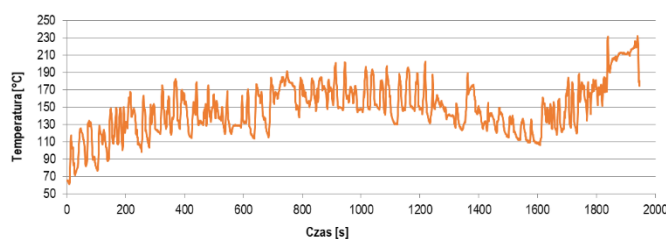


Rys. 14. Przebieg temperatury spalin za zintegrowanymi TWC i GPF



Rys. 15. Przebieg temperatury spalin za zintegrowanymi TWC i GPF po rozgrzaniu

Jako zakończenie zbadano również temperaturę na końcu układu wylotowego jako potwierdzenie zastosowanej metodyki (rys. 16). Uzyskane wartości w dużej mierze zgodziły się z tymi uzyskanymi podczas testu rzeczywistego pojazdu.



Rys. 16. Przebieg temperatury spalin na końcu układu wylotowego

3. Analiza uzyskanych wyników

We wszystkich analizowanych przypadkach, gdzie układ nie był wcześniej rozgrzewany zauważyć można wyraźną fazę rozgrzewania się, która trwa w zależności od przypadku 400 do 600 sekund. Porównując wyniki do pomiaru przed układem oczyszczania spalin (rys 9), zauważyć można, że układ cechuje się znaczną pojemnością cieplną. Pojemność ta zdaje się być zbliżona niezależnie od użytego materiału na nośnik, a zwiększenie liczby nośników nie zawsze wpływa na zmniejszenie temperatury.

Wstępne rozgrzanie układów przed badaniami wskazuje na to, że praktycznie cały przeprowadzany cykl jest swojego rodzaju rozgrzewaniem, gdy GPF jest pierwszy, gdyż uzyskiwane temperatury są większe przez cały test. Podczas gdy GPF był drugi w kolejności końcowa temperatura jest mniejsza (rys. 14 i 15) pomimo różnicy aż 242°C na początku badań.

Uzyskane wartości temperatury są zbyt niskie do pracy GPF w ramach zmniejszania masy zgromadzonych cząstek stałych. Do spowodowania zapłonu zgromadzonych w niepokrytym filtrze cząstek stałych wymagana jest temperatura około 550-580°C [6]. W przypadku pokrycia katalitycznego filtra musi ona wynieść około 440 °C i ta również nie jest została w badaniach osiągnięta. Temperatura o większej wartości zostanie osiągnięta dopiero podczas jazdy autostradowej i tam będzie realizowała się regeneracja filtra. Do

przeprowadzania regeneracji w mieście wymagana by była aktywna regeneracja filtra poprzez sztuczne zwiększenie temperatury spalin np. przez zwiększone dawkowanie paliwa, bądź obciążenie silnika.

Podsumowanie

Układy oczyszczania spalin są obecne w praktycznie wszystkich pojazdach samochodowych poruszających się po drogach publicznych. Zaostrzenie norm sprawia, że układy te zmieniają się, ale idea ich działania pozostaje taka sama. Reakcje utleniania i redukcji w reaktorach zachodzą przy mieszance o określonym składzie oraz w odpowiednio wysokiej temperaturze. Badania przeprowadzone w ramach artykułu, stanowiące podwaliny do stworzenia filtra w ramach realizowanego projektu, udowodniły znaczne różnice uzyskiwanych wyników w zależności od konfiguracji i liczby użytych układów oczyszczania spalin. Wstępne rozgrzanie przed badaniami również nie umożliwiło wysnucia wniosków poza takim, że uzyskiwane temperatury są za niskie do rozpoczęcia procedury wypalania filtra cząstek stałych. Kolejne prace autorów dotyczyć będą prób stworzenia takiej budowy i katalizatorów by tą regenerację umożliwić.

Bibliografia

1. Antiopi S., Tassos S., Overview of Diesel Particulate Filter Systems sizing approaches, Applied Thermal Engineering. 121. 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.096.
2. Chłopek Z., Szczepański T., Ocena Zagrożenia Środowiska Cząstkami Stałymi Ze Źródeł Cywilizacyjnych, Inżynieria Ekologiczna Nr 30, 2012, s. 174-193.
3. Delphi Worldwide Emissions Standards Passenger Cars Light Duty 2016/17, 2016
4. Fiebig M., et al., *Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions*, J Occup Med Toxicol nr 6/2014.
5. Fuć P., Rozprawa habilitacyjna pt. Studium pasywnej regeneracji filtrów cząstek stałych w silnikach o zapłonie samoczynnym, Poznań 2013.
6. Kopacz A., W pogoni za sadzą, Wiadomości chemiczne, Kraków, 2014.
7. Maciej Siedlecki, Marta Galant, Łukasz Rymaniak, Andrzej Ziółkowski, Badania emisji zanieczyszczeń pojazdu wyposażonego w silnik z bezpośrednim wtryskiem benzyny w rzeczywistych warunkach eksploatacji, Autobusy 12/2017, s.404-409.
8. Mayer A., Czerwiński J., Comte P., Badania filtrów o częściowym przepływie spalin w zakresie redukcji cząstek stałych z silników o ZS, PTNSS nr2/2009 (137), 2009-207.
9. Merkiś J., Pielecha J., Emisja cząstek stałych ze źródeł motoryzacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2014.
10. Punke, A., Grubert, G., Li, Y., Dettling J., et al., "Catalyzed Soot Filters in Close Coupled Position for Passenger Vehicles," SAE Technical Paper 2006-01-1091, 2006,
11. Saliba G., Comparison of Gasoline Direct-Injection (GDI) and Port Fuel Injection (PFI) Vehicle Emissions: Emission Certifica-

tion Standards, Cold-Start, Secondary Organic Aerosol Formation Potential, and Potential Climate Impacts, Environ Sci Technol. 2017 Jun 6;51(11):6542-6552.

12. Sappok, A. and Wong, V., Ash Effects on Diesel Particulate Filter Pressure Drop Sensitivity to Soot and Implications for Regeneration Frequency and DPF Control, SAE Int. J. Fuels Lubr. 3(1):380-396, 2010,
13. Stępień, Z., Systemy filtracji spalin do samochodowych silników z zapłonem samoczynnym – problemy regeneracji filtrów DPF, Prace Naukowe Instytutu Nafty i Gazu nr 207/2016, s.1-439.

Analysis of the effect of exhaust aftertreatment systems configurations on the temperature measured in the exhaust system of a spark-ignition engine

The article discusses the effect of exhaust aftertreatment systems configuration on the resulting exhaust gas temperature at selected points of the exhaust system. Catalytic reactors and particle filters must reach a specific temperature in order to effectively perform their functions. The temperature they obtain decreases with the increasing distance from the exhaust manifold, as the gases cool along the way. The performed research consisted of measuring the exhaust gas temperature in various places of the exhaust system in simulated driving conditions mapped on the dynamic engine brake station in the aspect of using a particulate filter and its resulting operating efficiency due to the temperature. Measuring the temperature using thermocouples allowed to assess the probability of achieving full operation of the filters during urban and extra-urban exploitation in a simulation of real driving conditions.

Keywords: exhaust gas temperature, aftertreatment systems, GPF.

Autorzy:

Mgr inż. **Maciej Siedlecki** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, email: maciej.siedlecki@put.poznan.pl

Prof. nadzw. dr hab. inż. **Paweł Fuć** – Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Mgr inż. **Barbara Sokolnicka** — Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

Mgr inż. **Natlia Szymlet** — Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu

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

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)

